



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL STATCOM
UNTUK MEMINIMASI RUGI DAYA MENGGUNAKAN *GENETIC
ALGORITHM* PADA SISTEM TRANSMISI JAMALI TAHUN
2018**

Ristiardi Taharat PB
NRP 2215105043

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

**OPTIMAL LOCATION AND SIZING OF STATCOM FOR
MINIMIZING POWER LOSS USING GENETIC ALGORITHM IN
2018 JAMALI TRANSMISSION SYSTEM**

Ristiardi Taharat PB
NRP 2215105043

Advisors
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal STATCOM untuk Meminimasi Rugi Daya Menggunakan *Genetic Algorithm* Pada Sistem Transmisi JAMALI Tahun 2018” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2017

Ristiardi Taharat PB
NRP. 2215105043

**PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL STATCOM
UNTUK MEMINIMASI RUGI DAYA MENGGUNAKAN
GENETIC ALGORITHM PADA SISTEM TRANSMISI JAMALI
TAHUN 2018**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



24-7-2017

Vita L.B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001



SURABAYA
JULI, 2017

PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL STATCOM UNTUK MEMINIMASI RUGI DAYA MENGGUNAKAN GENETIC ALGORITHM PADA SISTEM TRANSMISI JAMALI TAHUN 2018

Nama : Ristiardi Taharat PB
NRP : 2215105043
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Pertumbuhan di bidang perindustrian mengakibatkan laju kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Berdasarkan RUPTL 2016-2025, pertumbuhan beban puncak sistem Jawa Bali pada 5 tahun terakhir rata-rata 5,8% per tahun dan beberapa kali mengalami periode siaga. Kondisi tersebut bisa juga terjadi pada masa yang akan datang. Dampaknya adalah sistem akan beroperasi secara berlebihan dan dapat menimbulkan permasalahan pada proses penyaluran energi listrik, seperti bertambahnya rugi daya pada saluran, deviasi tegangan yang melebihi batasan standar, bahkan *voltage collapse*. Suatu upaya yang dapat dilakukan untuk menangani peningkatan rugi daya dan memperbaiki profil tegangan adalah dengan menggunakan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). Pada tugas akhir ini dilakukan analisa pemasangan salah satu FACTS yaitu *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) pada sistem 500 kV Jawa Bali tahun 2018 untuk meminimalkan rugi daya menggunakan *genetic algorithm*. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pemasangan tiga buah STATCOM pada sistem 500 kV Jawa Bali dapat mengurangi rugi daya aktif dari 149.441 MW menjadi 145.467 MW. Selain itu, terjadi perbaikan profil tegangan awalnya tegangan terendah yaitu 0.9471 pu di GITET Muara Karang, kemudian tegangan terendah menjadi 0.9736 pu di GITET Duri Kosambi.

Kata Kunci : Rugi daya, deviasi tegangan, STATCOM, *genetic algorithm* (GA)

Halaman ini sengaja dikosongkan

**OPTIMAL LOCATION AND SIZING OF STATCOM FOR
MINIMIZING POWER LOSS USING GENETIC ALGORITHM IN
2018 JAMALI TRANSMISSION SYSTEM**

Name : Ristiardi Taharat PB
NRP : 2215105043
Advisor 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Advisor 2 : Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Growth in the industrial sector resulted in an increasing rate of electrical energy demand. Based on the RUPTL 2016-2025, the peak load growth of the Java Bali system in the last 5 years averaged 5.8% per year and several times experienced a standby period. Such conditions may also occur in the future. The impact is that the system will operate excessively and can cause problems in the process of electrical energy distribution, such as increased power losses in the channel, voltage deviation beyond the standard limit, even voltage collapse. An effort that can be made to handle increased power loss and improve the voltage profile is by using Flexible AC Transmission System (FACTS). In this final project, one FACTS analysis is performed, namely Static Synchronous Compensator (STATCOM) on 500 kV Java Java system in 2018 to minimize power loss using genetic algorithm. From the simulation results obtained that the installation of three STATCOM on 500 kV Java Bali system can reduce the loss of active power from 149,441 MW to 145,467 MW. In addition, an improvement in the initial stress profile of the lowest voltage is 0.9471 pu in GITET Muara Karang, then the lowest voltage becomes 0.9736 pu at GITET Duri Kosambi.

Key Words : Power loss, voltage deviation, STATCOM, genetic algorithm (GA)

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat ALLAH SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik dan hidayah-Nya, sehingga penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul “**Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal STATCOM untuk Meminimasi Rugi Daya Menggunakan *Genetic Algorithm* Pada Sistem Transmisi JAMALI Tahun 2018**” ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa selama proses penyusunan tugas akhir ini mengalami kendala-kendala, namun berkat nasihat, bimbingan, bantuan dari berbagai pihak dan berkah dari Allah SWT sehingga semua kendala yang ada dapat diatasi oleh penulis. Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua tercinta, Ayahanda Abu Bakar dan Ibunda Ristati serta seluruh anggota keluarga yang telah banyak memberikan perhatian, dukungan, semangat doa kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Ibu Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing 1 dan II yang telah memberi banyak ilmu dan arahan, semoga bapak sehat selalu dan diberi keberkahan ilmu.
3. Seluruh dosen Jurusan Teknik Elektro – ITS, yang telah banyak memberikan ilmu serta motivasi dalam memahami setiap ilmu yang dipelajari
4. Seluruh teman-teman LJ Elits gasal 2015 terutama rekan seperjuangan JAMALI dan PSSSL yang telah banyak memberikan masukan, bantuan dan motivasi, sukses selalu untuk kita semua teman-teman.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penulis berharap semoga nantinya tugas akhir ini bermanfaat jikapun ada kekurangan, saran serta kritik penulis harapkan, terima kasih.

Surabaya, Juni 2017

Ristiardi Taharat PB

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1 Klasifikasi Bus	5
2.1.2 Analisa Aliran Daya Dengan Metode Newton Raphson	6
2.2 Static Synchronous Compensator.....	9
2.2.1 Prinsip VSC Untuk Kompensasi Daya Reaktif	9
2.2.2 Pemodelan Aliran Daya	11
2.3 Genetic Algorithm.....	12
2.3.1 Istilah-istilah pada <i>Genetic Algorithm</i>	13
2.3.2 Proses pada <i>Genetic Algorithm</i>	14
BAB III PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL	
STATCOM MENGGUNAKAN <i>GENETIC ALGORITHM</i>	17
3.1 Sistem Kelistrikan Jawa Bali Tahun 2018.....	17
3.1.1 Data Beban dan Pembangkitan.....	17
3.1.2 Data Saluran	19
3.1.3 Topologi Sistem Kelistrikan Jawa Bali	21
3.1.4 Data Generator dan Transformer.....	23
3.2 Penentuan Lokasi dan Kapasitas STATCOM Menggunakan	
<i>Genetic Algorithm</i>	29
3.2.1 Pembacaan Data Awal	31
3.2.2 Inisialisasi Populasi.....	31

3.2.3 Dekode Kromosom	31
3.2.4 Evaluasi Fitness	32
3.2.5 Elitisme	34
3.2.6 Seleksi Induk atau Orang tua	34
3.2.7 Cross Over	34
3.2.8 Mutasi	35
3.3 Metodologi Simulasi	36
BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS	39
4.1 Data Simulasi	39
4.2 Klasifikasi Bus	39
4.3 Simulasi Kondisi awal Sistem.....	40
4.4 Optimisasi Lokasi dan Kapasitas STATCOM Menggunakan GA.....	49
4.4.1 Percobaan 1	50
4.4.2 Percobaan 2	54
4.4.3 Percobaan 3	58
BAB V PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	65
BIOGRAFI PENULIS	67
LAMPIRAN	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Typical bus sistem tenaga listrik	6
Gambar 2.2 STATCOM sistem. (a) VSC terhubung paralel dengan sistem kelistrikan melalui transformer. (b) Rangkaian ekuivalen.....	9
Gambar 2.3 Operasi dasar dari VSC: (a) VSC dihubungkan dengan bus sistem. Diagram vektor yang merepresentasikan (b) operasi lagging (c) operasi leading.....	10
Gambar 2.4 Rangkaian ekuivalen STATCOM	11
Gambar 2.5 Ilustrasi istilah dalam Algoritma Genetika	14
Gambar 3.1 Topologi jaringan sistem kelistrikan Jawa Bali sampai Maret 2017.....	22
Gambar 3.2 Topologi jaringan sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018	23
Gambar 3.3 Diagram alir optimasi menggunakan GA	30
Gambar 3.4 Ilustrasi inisialisasi populasi.....	31
Gambar 3.5 Ilustrasi pendekodean kromosom	32
Gambar 3.6 Ilustrasi proses cross over pada kromosom	35
Gambar 3.7 Ilustrasi proses mutasi pada kromosom.....	35
Gambar 3.8 Diagram alir metodologi simulasi	36
Gambar 4.1 Grafik tegangan tiap bus saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM.....	52
Gambar 4.2 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 1-27).....	53
Gambar 4.3 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 28-53).....	53
Gambar 4.4 Grafik tegangan tiap bus saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM.....	56
Gambar 4.5 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 1-27).....	57
Gambar 4.6 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 28-53).....	57
Gambar 4.7 Grafik tegangan tiap bus saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM.....	60
Gambar 4.8 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 1-27).....	61
Gambar 4.9 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 28-53).....	61

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data pembangkitan dan beban sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018.....	17
Tabel 3.2 Data saluran transmisi sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018	19
Tabel 3.3 Data unit generator sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 ..	24
Tabel 3.4 Data transformer pada pembangkit listrik sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018	26
Tabel 4.1 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 ..	40
Tabel 4.2 Rugi daya aktif saluran transmisi dan transformer pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018	42
Tabel 4.3 Arus masing-masing saluran pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018.....	47
Tabel 4.4 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan satu STATCOM	50
Tabel 4.5 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan dua STATCOM.....	54
Tabel 4.6 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan tiga STATCOM.....	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan di bidang perindustrian mengakibatkan laju pertumbuhan kebutuhan energi listrik terus meningkat. Hal ini mengakibatkan perusahaan penyedia energi listrik harus mengoperasikan sistem tenaga listrik mendekati batas kemampuannya. Dampaknya adalah sistem akan beroperasi secara berlebihan dan menimbulkan permasalahan pada keamanan sistem. Salah satu masalah yang sering terjadi karena pengoperasian sistem secara berlebihan adalah ketidakstabilan tegangan atau *voltage collapse*. Menjaga tegangan pada setiap bus agar berada pada batasan yang diperbolehkan dalam berbagai kondisi menjadi sangat penting [1]. Pada umumnya penyebab utama masalah ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem menyediakan daya reaktif. Untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif sehingga dapat memperbaiki profil tegangan dan kestabilan tegangan, pemasangan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) menjadi salah satu pilihan yang tepat [2]. Namun, untuk mendapatkan performa yang baik dari controller tersebut, penempatan dan kapasitas yang tepat dari peralatan ini menjadi hal yang krusial [1]. Berbagai metode telah dikembangkan untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal peralatan FACTS. Salah satu metode yang umum digunakan dalam masalah optimisasi adalah *Genetic Algorithm* [3].

Pulau Jawa merupakan daerah dengan laju pertumbuhan perindustrian yang cepat. Hal itu berdampak terhadap kebutuhan energi listrik yang terus bertambah. Namun, penambahan pembangkit belum mampu menangani pertumbuhan beban yang cepat. Dengan demikian, pengoperasian sistem tenaga listrik menjadi berlebihan. Salah satu solusi adalah melakukan pemasangan peralatan FACTS. Sehingga penulis membuat tugas akhir dengan judul Penentuan Lokasi dan Kapasitas Optimal STATCOM untuk Meminimasi Rugi Daya Menggunakan *Genetic Algorithm* pada Sistem Jawa Bali Tahun 2018.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi dan kapasitas STATCOM menggunakan *genetic algorithm* pada sistem 500 kV Jawa Bali pada tahun 2018.
2. Membandingkan tegangan tiap bus dan rugi daya setelah pemasangan STATCOM dengan sebelum pemasangan STATCOM.

1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa aliran daya dilakukan hanya dalam kondisi *steady state* dan kondisi sesaat.
2. Analisa aliran daya pada sistem Jawa Bali hanya dilakukan pada saluran 500 kV.
3. Pembangkitan daya oleh unit-unit generator tidak didasarkan *economic dispatch* atau manajemen energi.
4. Analisa sistem dilakukan dalam keadaan beban seimbang.

1.4 Tujuan

Tujuan akhir dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memperbaiki profil tegangan pada sistem 500 kV Jawa Bali tahun 2018.
2. Mengurangi rugi daya saluran transmisi 500 kV.
3. Mengetahui lokasi terbaik untuk pemasangan STATCOM.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan untuk penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur
Melakukan pengumpulan literatur yang dibutuhkan, dalam hal ini adalah buku-buku atau jurnal mengenai analisa sistem tenaga listrik, peralatan FACTS, *genetic algorithm*, dan sistem kelistrikan Jawa Bali.
2. Pengumpulan data
Data yang akan digunakan adalah berdasarkan RUPTL 2016-2025 dan data dari PT. PLN P2B Jawa Bali.
3. Pemodelan dan simulasi sistem
Membuat simulasi sistem 500 kV Jawa Bali menggunakan *software* ETAP dan MATLAB.

4. Analisa dan pembahasan terhadap hasil simulasi
5. Pembuatan laporan tugas akhir
Melakukan penulisan laporan tugas akhir yang menunjukkan hasil akhir dari tugas akhir ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk bahasan lebih lanjut, laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

- BAB I Berisi pembahasan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, dan sistematika penulisan.
- BAB II Berisi teori dasar mengenai analisa aliran daya sistem tenaga listrik, peralatan FACTS, dan *genetic algorithm*.
- BAB III Membahas mengenai sistem 500 kV Jawa Bali, data-data yang diperlukan untuk melakukan analisa, metode *genetic algorithm* untuk mengetahui lokasi dan kapasitas optimal STATCOM.
- BAB IV Berisi pembahasan tentang hasil simulasi aliran daya sistem 500 kV Jawa Bali tahun 2018, hasil simulasi aliran daya dengan pemasangan STATCOM, perbandingan sistem tanpa STATCOM dengan menggunakan STATCOM.
- BAB V Bab ini berisi mengenai kesimpulan dan saran.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Analisis Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik

Analisis aliran daya merupakan salah satu bagian penting dalam analisis sistem tenaga. Hasil dari analisis aliran daya dapat digunakan untuk menganalisis suatu sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit-pembangkit yang disalurkan melalui saluran transmisi sampai ke pusat-pusat beban dengan memperhatikan kapasitas daya yang disalurkan dan rugi-rugi yang ditimbulkan. Analisa aliran daya umumnya dilakukan dalam satuan per-unit (pu) dengan MVA base tertentu. Pada setiap bus terdapat empat parameter yang digunakan yaitu tegangan, sudut phasa, daya aktif, dan daya reaktif. [4]

Secara umum tujuan dari analisis aliran daya dimaksudkan untuk mendapatkan:

1. Besar tegangan dan sudut masing-masing bus sehingga dapat diketahui tingkat pemenuhan batas-batas operasi yang diperbolehkan.
2. Besar arus (daya) yang disalurkan lewat jaringan, sehingga bisa diidentifikasi tingkat pembebanannya.
3. Kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya, seperti analisis rugi-rugi transmisi, studi stabilitas tegangan, dan sebagainya.

2.1.1 Klasifikasi Bus

Dalam perhitungan aliran daya, terdapat beberapa parameter antara lain, daya aktif, daya reaktif, magnitudo tegangan, dan sudut tegangan. Dua dari empat parameter tersebut biasanya telah ditentukan, sedangkan lainnya dihitung. Oleh karena itu, bus dalam analisa aliran daya dapat dikelompokkan sebagai berikut: [4]

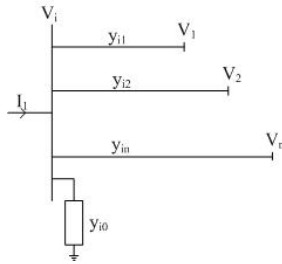
1. Bus beban (PQ Bus) adalah bus yang terhubung pada beban. Pada bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui. Sedangkan magnitudo tegangan dan sudut tegangan bus dihitung.
2. Bus generator (PV Bus) adalah bus yang terhubung dengan generator. Pada bus ini daya aktif dan magnitudo tegangan bus diketahui. Sedangkan daya reaktif dan sudut tegangan dihitung.
3. Bus referensi (Slack Bus) adalah bus yang terhubung dengan generator. Pada bus ini sudut tegangan dan magnitudo tegangan bus sudah ditentukan (tetap). Sedangkan daya reaktif dan daya aktif

dihitung. Umumnya, bus dengan kapasitas pembangkitan terbesar dipilih sebagai *slack bus*, hal ini dikarenakan bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi dan kekurangan daya pada jaringan.

2.1.2 Analisa Aliran Daya Dengan Metode Newton Raphson

Metode Newton Raphson merupakan metode yang paling sering digunakan untuk menyelesaikan analisa aliran daya karena pada sistem berskala besar metode Newton Raphson lebih efisien dan iterasi yang diperlukan untuk mendapatkan solusi tidak bergantung pada ukuran sistem. Dari gambar 2.1, arus yang mengalir menuju bus-i dapat dirumuskan, [5]

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.1)$$



Gambar 2.1 Typical bus sistem tenaga listrik [5]

Dari pers. 2.1, j juga termasuk bus- i . Jika dirumuskan dalam bentuk polar, maka,

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.2)$$

Daya pada bus- i adalah,

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.3)$$

Dengan mensubstitusi pers. 2.2 kedalam pers. 2.3,

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.4)$$

Sehingga daya aktif dan daya reaktif,

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.5)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.6)$$

Untuk menyelesaikan analisa aliran daya menggunakan metode Newton Raphson, maka dibentuk jacobian matrix sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Untuk PV bus, magnitudo tegangan sudah diketahui. Sehingga, jika terdapat m bus yang merupakan PV bus, maka m persamaan yang memiliki variabel ΔQ dan ΔV dan kolom pada jacobian matrix yang berhubungan akan dieliminasi. Sehingga terdapat n-1 batasan daya aktif dan n-1-m batasan daya reaktif dan jacobian matrix berorde $(2n-m-1) \times (2n-m-1)$.

Diagonal dan off diagonal elemen dari J1 yaitu,

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.9)$$

Diagonal dan of diagonal elemen dari J2 yaitu,

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.11)$$

Diagonal elemen dan off diagonal elemen dari J3 yaitu,

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.13)$$

Diagonal elemen dan off diagonal elemen dari J4 yaitu,

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.15)$$

Nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ merupakan perbedaan antara daya aktif dan daya reaktif yang telah dijadwalkan atau ditentukan dengan yang dihitung pada bus-i.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.16)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.17)$$

Sehingga tegangan bus-i menjadi,

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^k \quad (2.18)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.19)$$

Langkah-langkah untuk menyelesaikan analisa aliran daya menggunakan metode Newton Raphson adalah sebagai berikut:

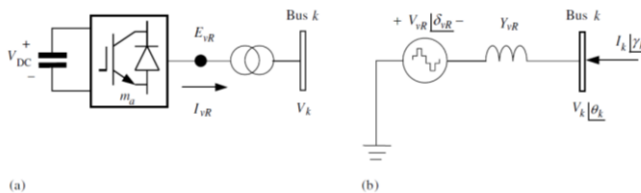
1. Untuk PQ bus, dimana P_i^{sch} dan Q_i^{sch} sudah ditentukan, magnitude tegangan dan sudut tegangan di seting sama dengan nilai *slack* bus, atau 1.0 dan 0.0. Untuk PV bus, dimana $|V_i|$ dan P_i^{sch} sudah ditentukan, sudut tegangan diseting sama dengan sudut tegangan *slack* bus, atau 0.0.
2. Untuk PQ bus, $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$ dihitung menggunakan pers. 2.5 dan pers. 2.6. $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ dihitung menggunakan pers. 2.16 dan pers. 2.17.
3. Untuk PV bus, $P_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$ dihitung menggunakan pers. 2.5 dan pers. 2.16.
4. Elemen jacobian matrix dihitung menggunakan pers. 2.8 sampai pers. 2.15.

5. Sudut tegangan dan magnitude tegangan baru dihitung menggunakan pers. 2.18 dan pers. 2.19.
6. Proses diatas akan terus diulangi sampai nilai $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ kurang dari toleransi yang ditentukan.

2.2 Static Synchronous Compensator

Static Synchronous Compensator (STATCOM) merupakan kompensator daya reaktif yang dihubungkan paralel dengan kemampuan mensuplai atau menyerap daya reaktif dimana outputnya dapat bervariasi untuk mengontrol parameter tertentu pada sistem tenaga listrik. STATCOM dianalogikan seperti mesin sinkron ideal, yang menghasilkan tiga tegangan sinusoidal, dengan amplitudo dan sudut fasa yang dapat diatur. Mesin ideal ini tidak memiliki inerti dan dapat menghasilkan daya reaktif (kapasitif maupun induktif) [6].

STATCOM terdiri dari sebuah *Voltage Source Converter* (VSC) dan terhubung paralel dengan transformer. STATCOM seperti kondensor sinkron namun dapat menghasilkan dan menyerap daya reaktif lebih cepat karena tidak memerlukan bagian berputar seperti pada kondensor sinkron. STATCOM dapat direpresentasikan seperti gambar 2.2 [7].



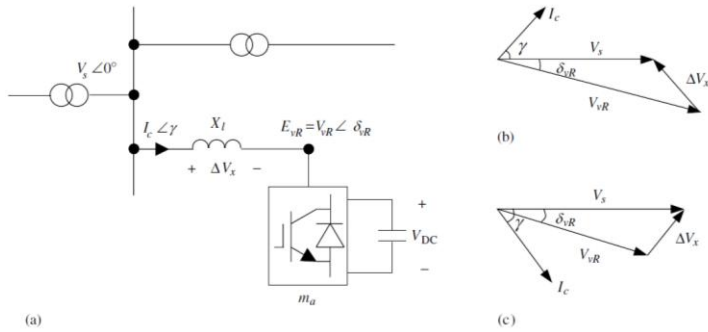
Gambar 2.2 STATCOM sistem. (a) VSC terhubung paralel dengan sistem kelistrikan melalui transformer. (b) Rangkaian ekuivalen. [7]

Untuk analisa dalam kondisi *steady state*, STATCOM dapat direpresentasikan seperti kondensor sinkron, atau lebih sering dimodelkan sebagai generator sinkron dengan daya aktif sama dengan nol [7].

2.2.1 Prinsip VSC Untuk Kompensasi Daya Reaktif

Interaksi antara VSC dengan sistem tenaga listrik dapat dijelaskan dengan sederhana, dengan menganggap VSC terhubung ke sistem tenaga listrik melalui reaktor (*loss-less reactor*), seperti ditunjukkan pada

gambar 2.3(a). Tujuannya adalah bahwa amplitudo dan sudut fasa dari drop tegangan (ΔV_x) melalui reaktor (X_l) dapat dikontrol, menentukan besar dan arah dari daya aktif dan daya reaktif yang mengalir melalui (X_l). Tegangan pada bus sistem merupakan sinusoidal dengan nilai $V_s \angle 0^\circ$, dan tegangan AC dari VSC bernilai $V_{vR} \angle \delta_{vR}$. Positif sekuen vektor pada gambar 2.3(b) dan 2.3(c) menunjukkan *leading* dan *lagging* kompensasi daya reaktif [7].



Gambar 2.3 Operasi dasar dari VSC: (a) VSC dihubungkan dengan bus sistem. Diagram vektor yang merepresentasikan (b) operasi *lagging* (c) operasi *leading* [7]

Berdasarkan gambar 2.3, untuk *leading* dan *lagging* VAR, daya aktif dan daya reaktif dapat dirumuskan, [7]

$$P = \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \sin \delta_{vR} \quad (2.20)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_l} - \frac{V_s V_{vR}}{X_l} \cos \delta_{vR} \quad (2.21)$$

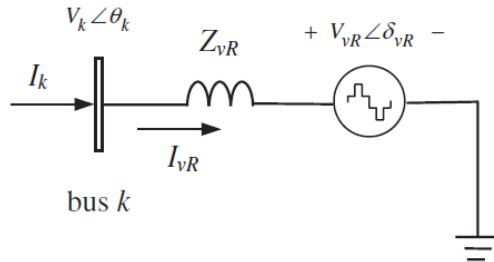
Berdasarkan gambar 2.3 serta pers. 2.20 dan pers. 2.21, maka dapat diamati bahwa,

- Daya aktif yang mengalir antara bus sistem dan VSC dapat diatur melalui sudut fasa δ_{vR} . Daya aktif mengalir dari bus sistem ke VSC saat lagging δ_{vR} ($\delta_{vR} > 0$).

- Daya reaktif yang mengalir ditentukan berdasarkan tegangan bus sistem (V_s) dan tegangan output VSC (V_{vR}). Saat $V_{vR} > V_s$, VSC mensuplai daya reaktif dan menyerap daya reaktif saat $V_{vR} < V_s$.

2.2.2 Pemodelan Aliran Daya

Berdasarkan penjelasan mengenai karakteristik STATCOM sebelumnya, maka dapat dikatakan bahwa untuk analisa aliran daya positif sekuen, STATCOM dapat direpresentasikan sebagai sumber tegangan sinkron dengan batas tegangan maksimum dan minimum tertentu [8].



Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen STATCOM

Persamaan aliran daya STATCOM dirumuskan untuk prinsip awal dengan mengasumsikan sumber tegangan,

$$E_{vR} = V_{vR} (\cos \delta_{vR} + j \sin \delta_{vR}) \quad (2.22)$$

Berdasarkan gambar 2.4, maka dapat dirumuskan,

$$S_{vR} = V_{vR} I_{vR}^* = V_{vR} Y_{vR}^* (V_{vR} - V_k) \quad (2.22)$$

Dari pers. 2.22 sebagai persamaan dasar dan gambar 2.4, maka daya aktif dan daya reaktif dapat diperoleh, untuk konverter dan bus k, yaitu:

$$P_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (2.23)$$

$$Q_{vR} = -V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (2.24)$$

$$P_k = V_k^2 G_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (2.25)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (2.26)$$

2.3 Genetic Algorithm

Genetic algorithm (algoritma genetika) pertama kali dicetuskan oleh John Holland lalu disempurnakan oleh David E. Goldberg. Algoritma genetika sebagai cabang dari algoritma evolusi merupakan metode adaptif yang biasa digunakan untuk memecahkan masalah pencarian nilai dalam permasalahan optimasi. Algoritma genetika berdasarkan proses genetik yang ada pada makhluk hidup, yakni perkembangan generasi dalam suatu populasi yang alami, secara lambat laun mengikuti prinsip seleksi alam. Dengan prinsip individu terkuat yang mampu bertahan.

Algoritma genetika menggunakan analogi secara langsung dari proses seleksi alam. Algoritma genetika diinisialisasi dengan sebuah populasi yang terdiri dari individu-individu, dimana masing-masing individu merepresentasikan sebuah solusi yang mungkin bagi permasalahan yang ada. Dalam hal ini, individu melambangkan sebuah nilai (*fitness*) yang menjadi acuan dalam mencari solusi terbaik dari permasalahan.

Individu pada populasi akan bereproduksi melalui perkawinan silang dengan individu lain. Hasil reproduksi dinamakan anak yang merupakan keturunan, anak tersebut akan membawa sifat dari induknya. Sedangkan individu dengan *fitness* rendah tidak terpilih untuk melakukan reproduksi dan akhirnya mati. Dengan demikian, generasi yang memiliki karakteristik yang baik akan lahir pada populasi. Banyaknya perkawinan antar individu akan menyebabkan kemungkinan generasi terbaik lahir semakin banyak.

Untuk dapat menjalankan algoritma genetika, diperlukan sebuah kode untuk merepresentasikan persoalan yang dihadapi. Kode berupa kromosom yang terdiri atas komponen genetika yang disebut gen. Dalam penerapannya, algoritma genetika memerlukan beberapa operator kerja, yaitu seleksi, perkawinan silang (*cross over*) dan mutasi (*mutation*). Untuk memperoleh hasil optimal, perlu dilakukan proses evaluasi terhadap *fitness* yang direpresentasikan oleh individu terpilih yang

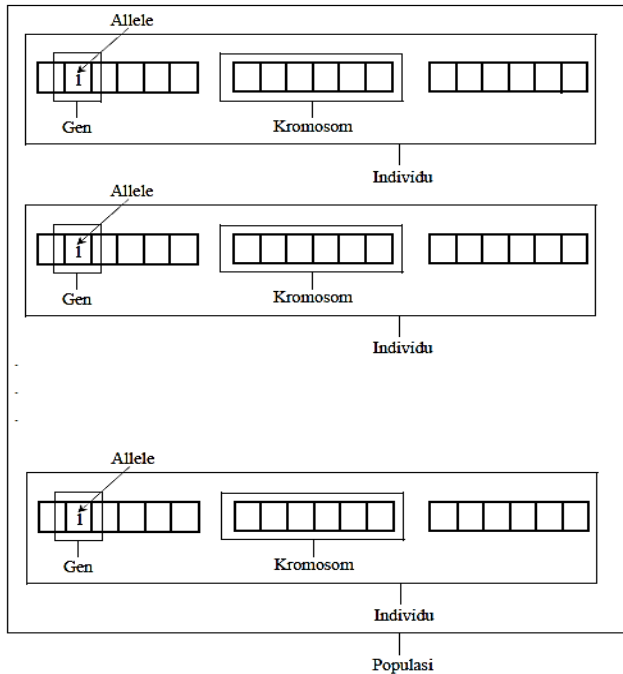
menjadi solusi. Hal ini berfungsi untuk mengecek apakah solusi telah sesuai dengan target yang diharapkan [9].

2.3.1 Istilah-istilah pada *Genetic Algorithm*

Algoritma genetika menggunakan istilah dari disiplin ilmu biologi. Hal tersebut karena algoritma ini didasari dari teori evolusi dan seleksi alam. Beberapa istilah yang digunakan pada algoritma genetika dalam mendefinisikan individu untuk menyelesaikan permasalahan adalah sebagai berikut: [10]

- a. Genotype (Gen), nilai yang menyatakan satuan dasar pada individu yang mendefinisikan arti tertentu. Gen dapat berupa nilai biner, float, integer, karakter maupun kombinatorial.
- b. Allele, nilai dari gen.
- c. Kromosom, sekumpulan gen yang membentuk satu kesatuan nilai.
- d. Individu, satu kesatuan kromosom yang menyatakan kemungkinan solusi dari permasalahan.
- e. Populasi, sekumpulan individu yang akan diproses bersama dalam satu siklus proses evolusi.
- f. Generasi, menyatakan satu siklus perulangan atau satu iterasi dalam algoritma genetika.
- g. Nilai fitness, nilai yang menyatakan baik tidaknya suatu solusi atau individu.

Gambar 2.5 merupakan ilustrasi yang menjelaskan istilah-istilah pada algoritma genetika.



Gambar 2.5 Ilustrasi istilah dalam Algoritma Genetika

2.3.2 Proses pada *Genetic Algorithm*

Genetic algorithm telah mengalami banyak pengembangan, sehingga banyak sekali variasi pada algoritma ini. Pada dasarnya *genetic algorithm* terdiri dari komponen-komponen sebagai berikut: [10]

a. Pengkodean

Pengkodean merupakan representasi suatu permasalahan kedalam bahasa komputasional dalam hal ini disebut gen. Skema yang paling umum digunakan untuk pengkodean adalah *Real-number encoding* $[0, R]$, *Discrete decimal encoding* $[0-9]$, *Binary encoding* $[0,1]$.

b. Evaluasi nilai fitness

Suatu individu dievaluasi berdasarkan suatu fungsi tertentu sebagai ukuran performansinya. Di dalam evolusi alam, individu yang bernilai fitness tinggi akan bertahan hidup. Sedangkan individu yang bernilai fitness rendah akan mati. Pada masalah optimasi, jika masalah yang dicari adalah memaksimalkan sebuah fungsi h , maka

nilai fitness yang digunakan adalah nilai dari fungsi h tersebut, yakni $f=h$. Tetapi jika masalahnya adalah meminimalkan fungsi h , maka nilai fitness yang digunakan adalah $f=1/h$. Namun jika nilai h dimungkinkan nol, maka nilai fitnessnya menjadi $f = \frac{1}{h+a}$, dimana a adalah bilangan kecil untuk menghindari nilai f menjadi tak hingga.

c. Seleksi

Pemilihan dua buah kromosom sebagai orang tua, yang akan mengalami *crossover*, biasanya dilakukan secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya. Suatu metode yang umum digunakan untuk seleksi adalah *roulette wheel*. Metode ini menirukan permainan *roulette wheel* dimana masing-masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda *roulette* secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya.

d. Perkawinan silang (*cross over*)

Proses *crossover* merupakan operator *genetic algorithm* yang melibatkan dua kromosom (orang tua) untuk membentuk kromosom baru (anak). *Crossover* menghasilkan titik baru dalam ruang pencarian yang siap untuk diuji. Operasi ini dilakukan secara acak dengan probabilitas 0,6 s/d 0,95.

e. Mutasi

Prosedur mutasi sangatlah sederhana. Untuk semua gen yang ada, jika bilangan acak yang dibangkitkan kurang dari probabilitas mutasi yang ditentukan maka ubah gen tersebut menjadi nilai kebalikannya (dalam *binary encoding*, 0 diubah 1, dan 1 diubah 0).

f. Elitisme

Karena seleksi dilakukan secara random, maka tidak ada jaminan bahwa individu dengan nilai fitness tertinggi akan selalu terpilih. Kalaupun terpilih, mungkin saja individu tersebut menjadi rusak karena proses *crossover*. Untuk menjadi individu dengan nilai fitness tinggi agar tidak hilang, maka perlu dibuat satu atau beberapa tiruannya. Prosedur ini disebut dengan elitisme.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

PENENTUAN LOKASI DAN KAPASITAS OPTIMAL STATCOM MENGGUNAKAN *GENETIC ALGORITHM*

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai penentuan lokasi dan kapasitas optimal STATCOM menggunakan metode *genetic algorithm*. Metode ini diterapkan pada sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 dengan tujuan memperoleh rugi daya yang paling minimal.

3.1 Sistem Kelistrikan Jawa Bali Tahun 2018

Pada tugas akhir ini, sistem yang dianalisa adalah sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 berdasarkan RUPTL 2016-2025 dan data yang diperoleh dari PT. PLN P2B Jawa Bali. Pada tahun 2018 diperkirakan terdapat 41 Gardu Induk 500 kV dan 13 Pembangkit Listrik yang siap beroperasi. Berikut ini merupakan data pembangkit, beban, saluran, dan topologi sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 [11, 12].

3.1.1 Data Beban dan Pembangkitan

Data beban dan pembangkitan sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 berdasarkan data yang diperoleh dari PT PLN P2B Jawa Bali saat beban puncak malam ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data pembangkitan dan beban sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 [11]

Bus No	GITET/Pembangkit	Beban		Pembangkitan	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	Paiton	1169.1	566.4	3950.0	633.23
2	Cirata	251.6	121.9	696.0	287.04
3	Saguling	0.0	0.0	420.9	105.80
4	Grati	423.1	205.0	600.2	204.04
5	New Suralaya	66.4	32.2	550.0	100.94
6	Suralaya	27.6	13.4	2610.4	794.27
7	Muara Tawar	239.3	115.9	2125.6	644.22
8	Tanjung Jati	248.4	120.3	2200.0	60.76

Tabel 3.1 Data pembangkitan dan beban sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 (lanjutan)

Bus No	GITET/Pembangkit	Beban		Pembangkitan	
		MW	MVAR	MW	MVAR
9	Gresik	142.3	68.9	684.4	265.02
10	Kediri	765.3	370.7	0.0	0.00
11	Pedan	766.9	371.5	0.0	0.00
12	Tasik	420.8	203.9	0.0	0.00
13	Depok	241.2	116.8	0.0	0.00
14	Balaraja	465.6	225.6	0.0	0.00
15	Gandul	838.3	406.1	0.0	0.00
16	Cibinong	338.1	163.8	0.0	0.00
17	Bandung Selatan	71.4	34.6	0.0	0.00
18	Krian	816.2	395.4	0.0	0.00
19	Ungaran	403.6	195.5	0.0	0.00
20	Mandirancan	352.5	170.8	0.0	0.00
21	Ujung Berung	347.7	168.4	0.0	0.00
22	Cibatu	701.5	339.8	0.0	0.00
23	Cawang	663.5	321.4	0.0	0.00
24	Kembangan	629.5	305.0	0.0	0.00
25	Cilegon	596.7	289.1	0.0	0.00
26	Bekasi	416.0	201.5	0.0	0.00
27	Ngimbang	277.2	134.3	0.0	0.00
28	Adipala	0.0	0.0	550.0	81.74
29	Cilacap	0.0	0.0	1350.0	30.34
30	Kesugihan	688.2	333.4	0.0	0.00
31	Sukatani	132.2	64.0	640.0	338.46
32	Banten	0.0	0.0	550.0	186.02
33	Muara Karang	224.0	108.5	0.0	0.00

Tabel 3.1 Data pembangkitan dan beban sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 (lanjutan)

Bus No	GITET/Pembangkit	Beban		Pembangkitan	
		MW	MVAR	MW	MVAR
34	Lengkong	358.1	173.5	0.0	0.00
35	Delta Mas	389.9	188.9	0.0	0.00
36	Tambun	496.0	240.3	0.0	0.00
37	Cikalong	439.9	213.1	0.0	0.00
38	Bangil	354.3	171.6	0.0	0.00
39	Tandes	460.9	223.3	0.0	0.00
40	Duri Kosambi	610.0	295.5	0.0	0.00
41	Batang	293.5	142.2	0.0	0.00
TOTAL		16126.8	7812.5	16927.5	3731.9

Satuan per unit ditentukan dengan menggunakan MVA base = 100 MVA.

3.1.2 Data Saluran

Data saluran transmisi 500 kV sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 berdasarkan RUPTL 2016-2025 dan data yang diperoleh dari PT PLN P2B Jawa Bali ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data saluran transmisi sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 [11, 12]

No	Dari Bus	Ke Bus	R(pu)	X(pu)	1/2B(pu)	Kms
1	1	4	0.000444	0.004962	0.8944545	88.363
2	2	35	0.000137	0.001316	0.2356553	23.3785
3	3	2	0.000153	0.001473	0.2636928	26.16
4	3	17	0.000188	0.002106	0.3795938	37.5
5	5	6	0.000015	0.000168	0.0075919	1.5
6	6	14	0.000377	0.003620	0.6481440	64.3
7	6	25	0.000065	0.000722	0.1302158	12.864

Tabel 3.2 Data saluran transmisi sistem kelitrikan Jawa Bali tahun 2018
(lanjutan)

No	Dari Bus	Ke Bus	R(pu)	X(pu)	1/2B(pu)	Kms
8	7	23	0.000479	0.004600	0.2058840	40.85
9	7	31	0.000141	0.001356	0.2427163	24.079
10	8	11	0.001687	0.019417	1.1725144	211.98
11	8	19	0.001073	0.012348	0.7456125	134.8
12	10	38	0.000217	0.002432	0.4384207	43.3115
13	11	10	0.000703	0.007860	1.4166742	139.953
14	11	30	0.001529	0.017101	3.0823013	304.5
15	13	37	0.000692	0.007736	1.3944250	137.755
16	14	24	0.000318	0.003664	0.8850000	80
17	14	34	0.000136	0.001309	0.2343600	23.25
18	15	13	0.000125	0.001198	0.2144117	21.271
19	15	24	0.000151	0.001693	0.3051225	30.143
20	16	3	0.000421	0.004706	0.8482250	83.796
21	16	7	0.001117	0.010733	0.4804128	95.32
22	16	13	0.000082	0.000787	0.1408781	13.976
23	17	20	0.003441	0.038492	1.7344904	342.7
24	17	21	0.000385	0.003703	0.1657656	32.89
25	17	37	0.000020	0.000225	0.0404900	4
26	18	4	0.000401	0.004491	0.8093951	79.96
27	18	9	0.000140	0.001348	0.2413152	23.94
28	18	19	0.002979	0.028623	1.2811680	254.2
29	18	27	0.000560	0.005382	0.2409120	47.8
30	19	8	0.000677	0.007570	1.3645130	134.8
31	19	11	0.000905	0.008690	0.3889872	77.18
32	19	27	0.003489	0.033521	1.5004080	297.7
33	20	41	0.000674	0.006477	1.1597040	115.05

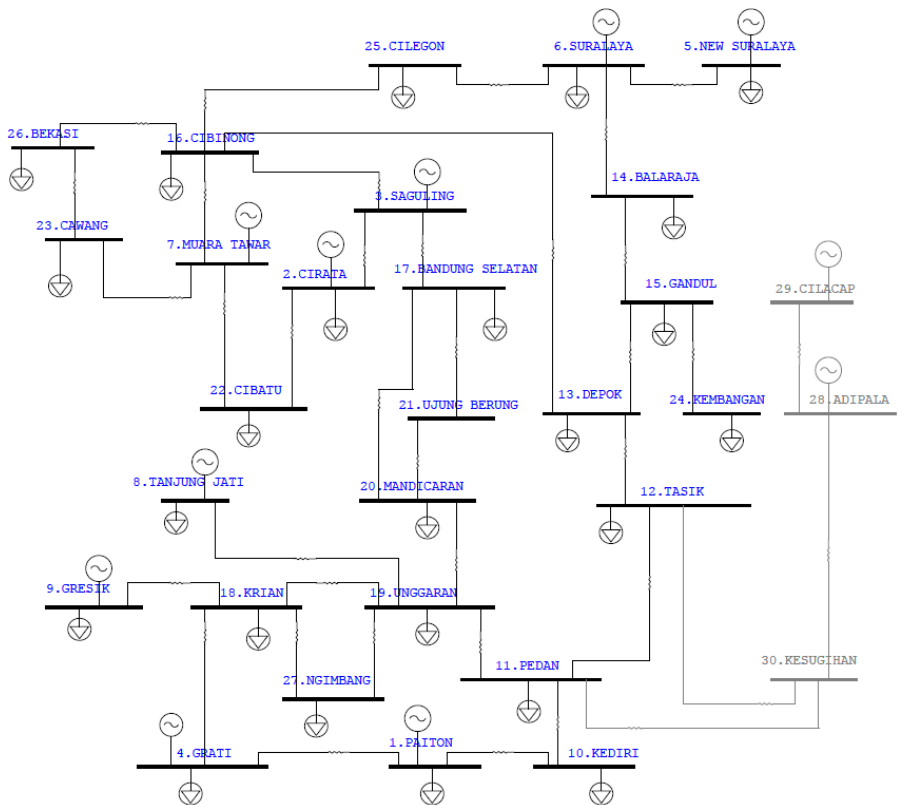
Tabel 3.2 Data saluran transmisi sistem kelitrikan Jawa Bali tahun 2018 (lanjutan)

No	Dari Bus	Ke Bus	R(pu)	X(pu)	1/2B(pu)	Kms
34	21	20	0.003441	0.038492	1.7344904	342.7
35	25	16	0.001313	0.014693	0.6620925	130.816
36	26	7	0.000141	0.001351	0.0604800	12
37	26	23	0.000197	0.001896	0.0848736	16.84
38	28	29	0.000019	0.000219	0.0529894	4.79
39	28	30	0.000055	0.000633	0.1529944	13.83
40	30	12	0.001529	0.017101	3.0823013	304.5
41	31	22	0.000141	0.001356	0.2427163	24.079
42	32	5	0.000188	0.001810	0.3240720	32.15
43	32	14	0.000188	0.001810	0.3240720	32.15
44	33	40	0.000119	0.001374	0.3318750	30
45	34	15	0.000136	0.001309	0.2343600	23.25
46	35	22	0.000137	0.001316	0.2356553	23.3785
47	36	16	0.000111	0.001067	0.1911168	18.96
48	36	26	0.000111	0.001067	0.1911168	18.96
49	37	12	0.000692	0.007736	1.3944250	137.755
50	38	1	0.000217	0.002432	0.4384207	43.3115
51	39	9	0.000100	0.001123	0.2024500	20
52	40	24	0.000024	0.000275	0.0663750	6
53	41	19	0.000674	0.006477	1.1597040	115.05

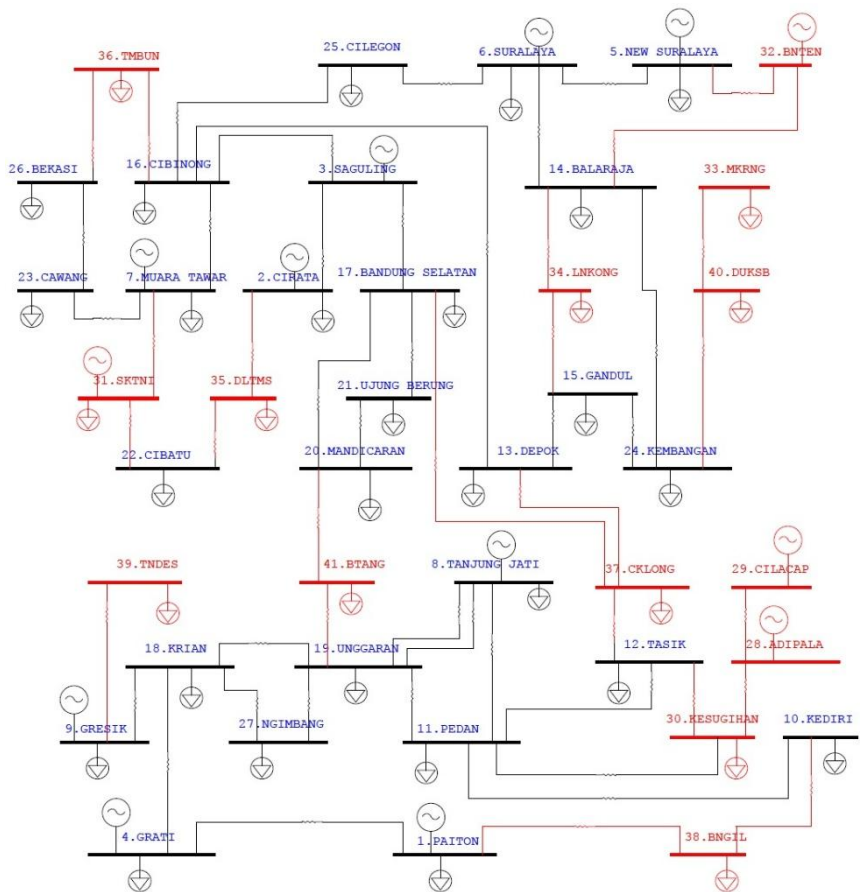
Satuan per unit ditentukan dengan menggunakan MVA base = 100 MVA dan KV base = 500 kV.

3.1.3 Topologi Sistem Kelistrikan Jawa Bali

Topologi sistem kelistrikan Jawa Bali saat ini ditunjukkan pada gambar 3.1 dan berdasarkan perencanaan, topologi sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3.1 Topologi jaringan sistem kelistrikan Jawa Bali sampai Maret 2017 [11]



Gambar 3.2 Topologi jaringan sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 [11, 12]

3.1.4 Data Generator dan Transformer

Data generator dan transformer dari masing-masing pembangkit listrik pada sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 berdasarkan RUPTL 2016-2025 dan data yang diperoleh dari PT PLN P2B Jawa Bali ditunjukkan pada tabel 3.3 dan tabel 3.4.

Tabel 3.3 Data unit generator sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018
[11, 12]

Unit	DMN (MW)	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)
ADIPALA1	637.5	-120	360
BANTEN1	637.5	-120	360
CILACAP3	637.5	-120	360
CILACAP4	637.5	-120	360
CILACAP5	637.5	-120	360
CIRATA1	126	-61	61
CIRATA2	126	-61	61
CIRATA3	126	-61	61
CIRATA4	126	-61	61
CIRATA5	126	-61	61
CIRATA6	126	-61	61
CIRATA7	126	-61	61
CIRATA8	126	-61	61
CLMYA1	637.5	-120	360
CLMYA2	637.5	-120	360
GRATI1.0	200	-50	110
GRATI1.1	120	-24	72
GRATI1.2	120	-24	72
GRATI1.3	120	-24	72
GRATI2.0	200	-50	110
GRATI2.1	200	-50	110
GRESIK2.0	200	-110	120
GRESIK2.1	120	-65	70
GRESIK2.2	120	-65	70
GRESIK2.3	120	-65	70
GRESIK3.0	200	-110	120

Tabel 3.3 Data unit generator sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018
(lanjutan)

Unit	DMN (MW)	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)
GRESIK3.3	120	-65	70
GRESIK4.1	200	-110	120
GRESIK4.2	200	-110	120
MTAWAR1.0	230.4	-50	110
MTAWAR1.1	148	-50	110
MTAWAR1.2	148	-50	110
MTAWAR1.3	148	-50	110
MTAWAR2.1	148	-50	110
MTAWAR2.2	148	-50	110
MTAWAR3.1	148.8	-50	110
MTAWAR3.2	148.8	-50	110
MTAWAR3.3	148.8	-50	110
MTAWAR4.1	148.8	-50	110
MTAWAR4.2	148.8	-50	110
MTAWAR4.3	148.8	-50	110
MTAWAR5.0	230.4	-50	110
MTAWAR5.1	148	-50	110
MTAWAR6.1	230.4	-50	110
MTAWAR6.2	230.4	-50	110
NEW SLAYA	588	-120	360
PAITON1	378.4	-180	240
PAITON2	378.4	-180	240
PAITON3	836	-120	360
PAITON5	640	-120	360
PAITON6	640	-120	360
PAITON7	640	-120	360

Tabel 3.3 Data unit generator sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018
(lanjutan)

Unit	DMN (MW)	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)
PAITON8	640	-120	360
PAITON9	640	-120	360
SAGULING1	175.185	-35	110
SAGULING2	175.185	-35	110
SAGULING3	175.185	-35	110
SAGULING4	175.185	-35	110
SLAYA1	425	-60	240
SLAYA2	425	-60	240
SLAYA3	425	-60	240
SLAYA4	425	-60	240
SLAYA5	637.5	-120	360
SLAYA6	637.5	-120	360
SLAYA7	637.5	-120	360
TJATI1	721.8	-120	360
TJATI2	721.8	-120	360
TJATI3	721.8	-120	360
TJATI4	721.8	-120	360

Tabel 3.4 Data transformer pada pembangkit listrik sistem kelistrikan
Jawa Bali tahun 2018 [11, 12]

Transformer	Rating (MVA)	Zpos(%)	Rpos(%)	Xpos(%)
TR-ADIPALA1	750	12.000	0.240	11.998
TR-BANTEN1	750	12.000	0.240	11.998
TR-CILACAP3	750	12.000	0.240	11.998
TR-CILACAP4	750	12.000	0.240	11.998
TR-CILACAP5	750	12.000	0.240	11.998
TR-CIRATA1	279.9	18.000	0.100	18.000

Tabel 3.4 Data transformer pada pembangkit listrik sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 (lanjutan)

Transformer	Rating (MVA)	Zpos(%)	Rpos(%)	Xpos(%)
TR-CIRATA2	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CIRATA3	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CIRATA4	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CIRATA5	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CIRATA6	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CIRATA7	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CIRATA8	279.9	18.000	0.100	18.000
TR-CLMYA1	750	12.000	0.240	11.998
TR-CLMYA2	750	12.000	0.240	11.998
TR-GRATI1.0	250	13.800	0.092	13.800
TR-GRATI1.1	153	11.800	0.091	11.800
TR-GRATI1.2	153	11.800	0.091	11.800
TR-GRATI1.3	153	11.800	0.091	11.800
TR-GRATI2.0	250	13.800	0.092	13.800
TR-GRATI2.1	250	13.800	0.092	13.800
TR-GRESIK2.0	250	13.500	0.090	13.500
TR-GRESIK2.1	153	11.920	0.092	11.920
TR-GRESIK2.2	153	11.920	0.092	11.920
TR-GRESIK2.3	153	11.920	0.092	11.920
TR-GRESIK3.0	250	13.500	0.090	13.500
TR-GRESIK3.3	153	11.920	0.092	11.920
TR-GRESIK4.1	250	13.500	0.090	13.500
TR-GRESIK4.2	250	13.500	0.090	13.500
TR-MTAWAR1.0	300	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR1.1	190	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR1.2	190	17.000	0.100	17.000

Tabel 3.4 Data transformer pada pembangkit listrik sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 (lanjutan)

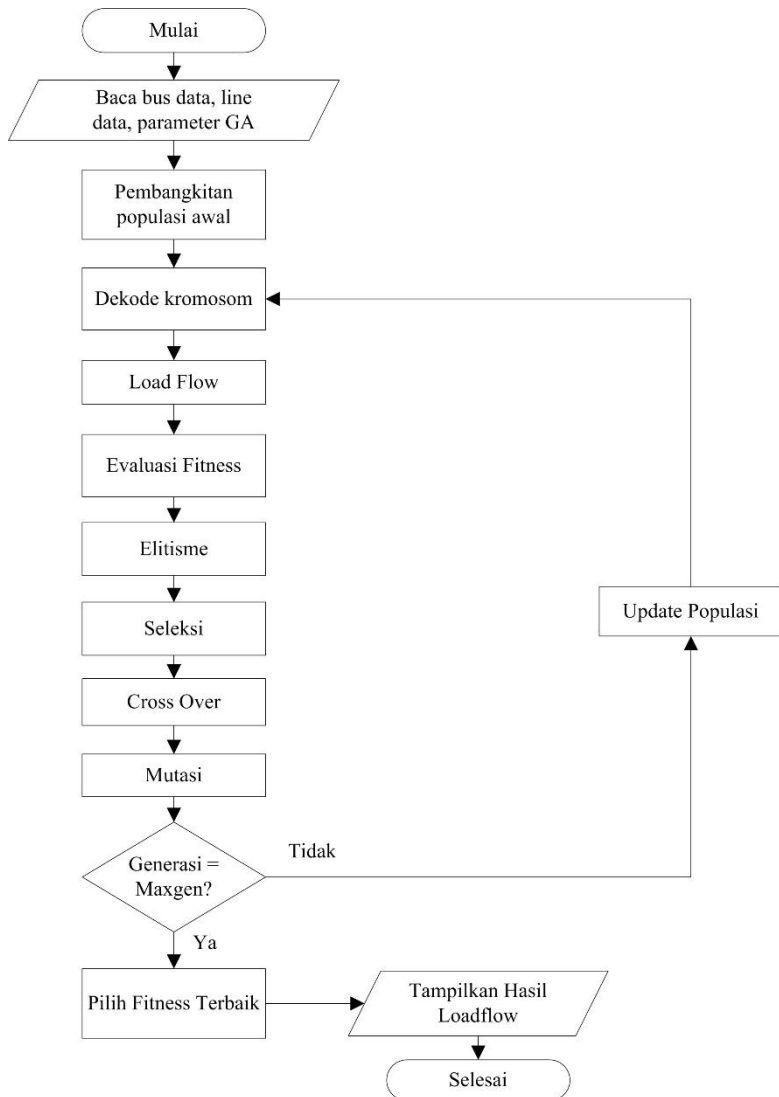
Transformer	Rating (MVA)	Zpos(%)	Rpos(%)	Xpos(%)
TR-MTAWAR1.3	190	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR1.31	190	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR2.1	190	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR2.2	190	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR3.1	140	12.000	0.100	12.000
TR-MTAWAR3.2	140	12.000	0.100	12.000
TR-MTAWAR3.3	140	12.000	0.100	12.000
TR-MTAWAR4.1	140	12.000	0.100	12.000
TR-MTAWAR4.2	140	12.000	0.100	12.000
TR-MTAWAR4.3	140	12.000	0.100	12.000
TR-MTAWAR5.0	300	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR6.1	300	17.000	0.100	17.000
TR-MTAWAR6.2	300	17.000	0.100	17.000
TR-NEW SLAYA	750	12.000	0.240	11.998
TR-PAITON1	470	12.000	0.100	12.000
TR-PAITON2	470	12.000	0.100	12.000
TR-PAITON3	1008	16.800	0.140	16.799
TR-PAITON5	650	12.000	0.100	12.000
TR-PAITON6	650	12.000	0.100	12.000
TR-PAITON7	650	12.000	0.100	12.000
TR-PAITON8	650	12.000	0.100	12.000
TR-PAITON9	650	12.000	0.100	12.000
TR-SAGULING1	206	18.000	0.100	18.000
TR-SAGULING2	206	18.000	0.100	18.000
TR-SAGULING3	206	18.000	0.100	18.000
TR-SAGULING4	206	18.000	0.100	18.000

Tabel 3.4 Data transformer pada pembangkit listrik sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 (lanjutan)

Transformer	Rating (MVA)	Zpos(%)	Rpos(%)	Xpos(%)
TR-SLAYA1	470	12.000	0.240	11.998
TR-SLAYA2	470	12.000	0.240	11.998
TR-SLAYA3	470	12.000	0.240	11.998
TR-SLAYA4	470	12.000	0.240	11.998
TR-SLAYA5	750	12.000	0.240	11.998
TR-SLAYA6	750	12.000	0.240	11.998
TR-SLAYA7	750	12.000	0.240	11.998
TR-TJATI1	786	16.500	0.138	16.499
TR-TJATI2	786	16.500	0.138	16.499
TR-TJATI3	786	16.500	0.138	16.499
TR-TJATI4	786	16.500	0.138	16.499

3.2 Penentuan Lokasi dan Kapasitas STATCOM Menggunakan *Genetic Algorithm*

Genetic Algorithm merupakan suatu algoritma pencarian yang terinspirasi dari proses seleksi alam. Metode algoritma genetika dipilih karena dinilai sederhana dan praktis untuk menyelesaikan permasalahan optimasi [9]. Gambar 3.3 merupakan diagram alir dari penerapan metode algoritma genetika untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal STATCOM pada sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018.



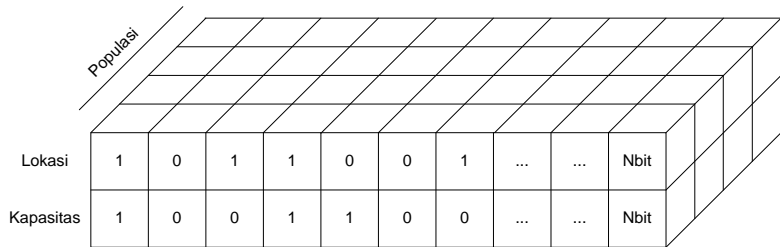
Gambar 3.3 Diagram alir optimasi menggunakan GA

3.2.1 Pembacaan Data Awal

Pada awalnya, program membaca data berupa data bus, data saluran, dan parameter GA. Pembacaan awal ini dilakukan untuk mengetahui data yang digunakan sebagai *constrain*/batasan dan parameter GA yang akan digunakan.

3.2.2 Inisialisasi Populasi

Pada tahap ini, dilakukan inisialisasi populasi awal yang terdiri dari sejumlah individu/kromosom sesuai dengan parameter GA yang telah ditentukan. Individu/kromosom tersebut terdiri dari sekumpulan gen berupa nilai biner yang dibangkitkan secara acak. Panjang bit kromosom ditentukan berdasarkan parameter GA, dalam kasus ini satu lokasi dan satu STATCOM direpresentasikan dalam kromosom dengan panjang masing-masing 16 bit.



Gambar 3.4 Ilustrasi inisialisasi populasi

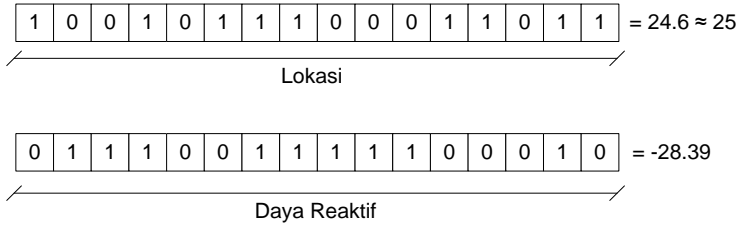
3.2.3 Dekode Kromosom

Populasi terdiri dari individu yang telah diinisialisasi dalam bentuk bilangan biner tidak dapat digunakan secara langsung untuk memperbarui data bus. Individu berupa bilangan biner harus didekodekan atau diterjemahkan ke dalam bentuk bilangan desimal sesuai dengan data sistem yang dianalisa. Selanjutnya individu yang telah didekodekan akan digunakan untuk memperbarui data bus sistem. Dari data bus yang baru, kemudian proses *loadflow* dikerjakan sehingga nilai fitness dari masing-masing individu dapat diketahui. Pendekodean kromosom dalam bentuk bilangan biner menjadi bilangan desimal dapat dilakukan menggunakan perumusan sebagai berikut,

$$x = r_b + \frac{(r_a - r_b)}{\sum_{i=1}^N 2^{-i}} (g_1 2^{-1} + g_2 2^{-2} + \dots + g_N 2^{-N}) \quad (3.1)$$

Dimana: x = hasil dekode berupa bilangan desimal
 r_a = batas atas interval bilangan desimal
 r_b = batas bawah interval bilangan desimal
 g = nilai gen
 N = jumlah gen dalam kromosom

Ilustrasi pendekodean kromosom lokasi dan kromosom daya reaktif dari STATCOM ditunjukkan pada gambar 3.5. Dari hasil pendekodean kromosom tersebut diperoleh STATCOM dengan daya reaktif -28.39 MVAR pada bus 25 akan dimasukkan kedalam data bus sistem, kemudian dilakukan proses *loadflow* untuk mengetahui nilai fitness kromosom tersebut.



Gambar 3.5 Ilustrasi pendekodean kromosom

3.2.4 Evaluasi Fitness

Suatu individu dievaluasi berdasarkan suatu fungsi tertentu sebagai ukuran performansinya. Individu yang bernilai fitness tinggi akan bertahan hidup dan individu yang bernilai fitness rendah akan mati. Pada tahap ini, individu yang merupakan representasi lokasi dan daya reaktif STATCOM akan dievaluasi nilai fitnessnya. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui individu dengan nilai fitness terbaik dalam suatu populasi.

Pada tugas akhir ini, fungsi objektif yang diinginkan dari penentuan lokasi dan kapasitas STATCOM adalah total rugi daya nyata dan total deviasi tegangan yang paling minimal.

Total rugi daya aktif, [3]

$$P_L = \sum_{k=1}^{NTL} [g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (3.2)$$

Dimana: P_L = total rugi daya aktif sistem
 N_{TL} = jumlah saluran transmisi
 k = konduktansi saluran-k

Total deviasi tegangan, [3]

$$VD = \sum_{k=1}^{N_L} (V_k - V_k^{ref}) / (3.3)$$

Dimana: VD = total deviasi tegangan
 N_L = jumlah bus
 $V_k^{ref} = 1.0$ pu

Pada sistem kelistrikan umumnya tegangan pada bus beban tidak boleh melebihi batas toleransinya yaitu $\pm 5\%$ dari tegangan nominal [3].

Fungsi objektif,

$$\text{Minimize } F = P_L + VD \quad (3.4)$$

Dengan fungsi objektif yang telah ditetapkan maka setiap individu akan dievaluasi nilai fitnessnya. Individu yang memenuhi batasan/*constraint* akan dipilih menjadi calon solusi. Batasan yang diberikan untuk optimisasi lokasi dan kapasitas STATCOM yaitu daya reaktif STATCOM (-300 MVAR sampai 300 MVAR) dan daya reaktif generator. Daya reaktif generator tidak boleh melebihi limit generator (Q_{min} dan Q_{max}),

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad i=1,2, \dots, NG \quad (3.5)$$

Untuk operasi aman generator, maka setiap generator dihindarkan agar tidak beroperasi pada wilayah *underexcited* [13]. Sehingga batasan daya reaktif generator menjadi,

$$0 < Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad i=1,2, \dots, NG \quad (3.6)$$

3.2.5 Elitisme

Pada setiap generasi (iterasi) akan didapatkan individu-individu dengan nilai fitness yang menggambarkan seberapa baik individu tersebut. Dimana pada tugas akhir ini nilai fitness dari masing-masing individu merupakan total rugi daya sistem saat individu tersebut dievaluasi. Untuk tiap generasi terdapat satu nilai fitness terbaik yang mewakili total rugi daya paling minimal. Karena adanya proses *cross over* dan mutasi maka terdapat kemungkinan individu dengan nilai fitness terbaik akan berubah. Oleh karena itu diperlukan sebuah tempat atau wadah yang dapat menampung individu pada setiap generasi dengan nilai fitness terbaik. Individu dengan nilai fitness terbaik akan dijaga sampai ditemukan individu baru dengan nilai fitness yang lebih baik. Proses ini disebut elitisme, dimana hasil akhirnya berupa lokasi dan kapasitas STATCOM yang terbaik dengan total rugi daya paling kecil.

3.2.6 Seleksi Induk atau Orang tua

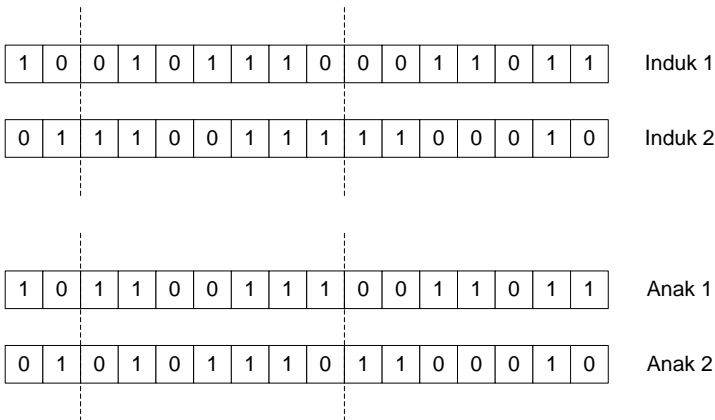
Metode seleksi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah metode seleksi *roulette wheel* (roda roulette). Metode ini meniru permainan roda roulette dimana masing-masing kromosom menempati potongan lingkaran pada roda roulette secara proporsional sesuai dengan nilai fitnessnya. Kromosom dengan nilai fitness lebih besar akan menempati potongan lingkaran yang lebih besar dibandingkan dengan kromosom bernilai fitness rendah. Dengan demikian, kromosom dengan nilai fitness baik memiliki kemungkinan lebih besar untuk terpilih dibandingkan kromosom dengan nilai fitness rendah.

3.2.7 Cross Over

Cross over (perkawinan silang) merupakan salah satu operator dalam algoritma genetika yang melibatkan dua induk (orang tua) untuk menghasilkan keturunan (anak) baru. Dari proses ini diharapkan keturunan yang dihasilkan memiliki nilai fitness yang baik. Proses *cross over* merupakan proses pertukaran gen dari dua induk secara acak. Proses *cross over* dilakukan pada setiap orang tua dengan probabilitas *cross over* yang ditentukan pada parameter GA. Apabila nilai acak yang dihasilkan kurang dari probabilitas *cross over* maka akan dilakukan proses *cross over* pada orang tua tersebut.

Metode *cross over* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah metode *cross over* satu titik. Pada metode satu titik, masing-masing kromosom orang tua dibagi menjadi dua bagian dan saling dipindah

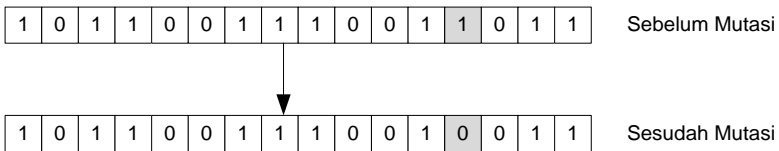
silangkan untuk menghasilkan dua keturunan baru. Berikut ini ilustrasi proses *cross over* satu titik,



Gambar 3.6 Ilustrasi proses *cross over* pada kromosom

3.2.8 Mutasi

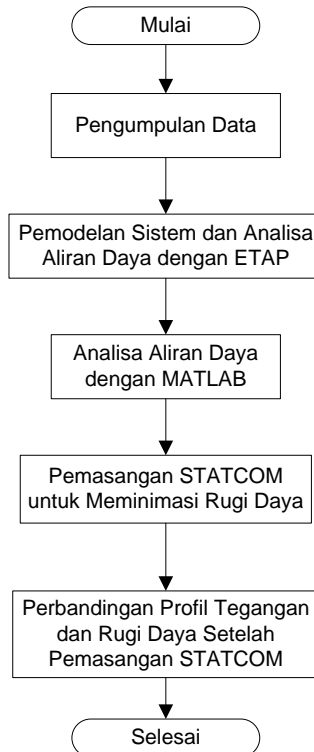
Mutasi merupakan proses perubahan nilai pada salah satu atau beberapa gen dari kromosom anak hasil perkawinan silang. Sama halnya dengan proses *cross over*, proses mutasi memiliki probabilitas atau kemungkinan terjadi mutasi yang telah ditentukan pada parameter GA. Proses mutasi yang dilakukan adalah dengan menginversi nilai gen pada posisi tertentu suatu kromosom. Berikut ini merupakan ilustrasi proses mutasi,



Gambar 3.7 Ilustrasi proses mutasi pada kromosom

3.3 Metodologi Simulasi

Proses penyelesaian tugas akhir dilakukan dengan simulasi menggunakan *software*. Adapun tahapan yang perlu dilakukan dari awal hingga akhir pengerjaan tugas akhir ditunjukkan seperti gambar 3.8.



Gambar 3.8 Diagram alir metodologi simulasi

Berdasarkan gambar 3.8, metodologi simulasi yang dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Setelah mendapatkan data-data sistem kelistrikan Jawa Bali yang diperlukan, maka dilakukan pemodelan sistem dan analisa aliran daya menggunakan ETAP 12.6.
- Kemudian analisa aliran daya sistem dilakukan menggunakan MATLAB dan hasil analisa aliran daya menggunakan MATLAB divalidasi dengan hasil analisa aliran daya ETAP.

- c. Setelah analisa aliran daya MATLAB benar (sama dengan ETAP), maka selanjutnya dilakukan simulasi pemasangan STATCOM dimana lokasi dan kapasitasnya ditentukan menggunakan algoritma genetika.
- d. Profil tegangan dan rugi daya sistem setelah pemasangan STATCOM dibandingkan dengan sebelum pemasangan STATCOM untuk melihat perbaikan tegangan dan rugi daya karena pemasangan STATCOM pada sistem.
- e. Setelah simulasi berhasil dikerjakan, hasil dan analisa dituliskan dalam laporan tugas akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas mengenai simulasi dan analisis terhadap sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018. Simulasi dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem kelistrikan Jawa Bali dan untuk mengetahui pengaruh pemasangan STATCOM terhadap sistem khususnya rugi daya aktif dan tegangan pada tiap bus (GITET).

4.1 Data Simulasi

Pada tugas akhir ini data untuk simulasi yang diperlukan adalah data sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018. Data-data yang dibutuhkan meliputi impedansi saluran transmisi, data transformer, data pembangkit, dan data beban dilampirkan pada sub bab 3.1.1 sampai 3.1.4. Simulasi yang dilakukan yaitu pada saat kondisi beban puncak malam (pukul 19.00) dengan total beban 16126 MW dan 7812 MVAR.

4.2 Klasifikasi Bus

Pada simulasi sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 terdapat 110 bus, dimana 41 bus merupakan GITET dan 69 bus merupakan bus penghubung generator dengan transformer. Pada tugas akhir ini, tegangan bus yang akan dianalisa adalah tegangan pada tiap GITET. Sehingga tegangan tiap bus yang akan dianalisa berjumlah 41 bus. Adapun klasifikasi bus yang digunakan untuk simulasi adalah sebagai berikut:

- a. Slack/Swing yaitu unit 1 pada pembangkit listrik suralaya
- b. Generator bus adalah bus yang terhubung langsung dengan generator/pembangkit listrik yaitu bus Paiton, Cirata, Saguling, Grati, New Suralaya, Suralaya, Muara Tawar, Tanjung Jati, Gresik, Adipala, Cilacap, Sukatani, dan Banten.
- c. *Load* bus yaitu bus Kediri, Pedan, Tasik, Depok, Balaraja, Gandul, Cibinong, Bandung Selatan, Krian, Ungaran, Mandirancan, Ujung Berung, Cibat, Cawang, Kembangan, Cilegon, Bekasi, Ngimbang, Kesugihan, Muara Karang, Lengkong, Delata Mas, Tambun, Cikalong, Bangil, Tandes, Duri Kosambi, Batang.

Untuk simulasi sistem kelistrikan Jawa Bali MVA base yang digunakan adalah 100 MVA.

4.3 Simulasi Kondisi Awal Sistem

Simulasi aliran daya sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB. Untuk kondisi awal sistem, hasil simulasi aliran daya menggunakan *software* MATLAB divalidasi dengan hasil aliran daya pada *software* ETAP. Setelah hasil simulasi menggunakan MATLAB sesuai dengan hasil simulasi ETAP, maka untuk simulasi selanjutnya hanya menggunakan MATLAB. Hasil simulasi sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018 berupa tegangan pada tiap bus ditunjukkan pada tabel 4.1 dan rugi daya aktif saluran dan transformer ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.1 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018

No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
1	Paiton	0.9887	0.9887	0.0000
2	Cirata	0.9782	0.9782	0.0007
3	Saguling	0.9807	0.9807	0.0010
4	Grati	0.9931	0.9931	0.0008
5	New Suralaya	0.9772	0.9772	0.0005
6	Suralaya	0.9775	0.9775	0.0005
7	Muara Tawar	0.9712	0.9712	0.0004
8	Tanjung Jati	1.0384	1.0383	0.0023
9	Gresik	0.9933	0.9933	0.0006
10	Kediri	0.9904	0.9904	0.0022
11	Pedan	1.0244	1.0244	0.0017
12	Tasik	1.0042	1.0041	0.0007
13	Depok	0.9628	0.9628	0.0009
14	Balaraja	0.9632	0.9632	0.0000
15	Gandul	0.9555	0.9555	0.0001
16	Cibinong	0.9652	0.9652	0.0006
17	Bandung Selatan	0.9860	0.9860	0.0006
18	Krian	0.9933	0.9933	0.0005

Tabel 4.1 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018
(lanjutan)

No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
19	Ungaran	1.0344	1.0344	0.0014
20	Mandirancan	1.0278	1.0278	0.0012
21	Ujung Berung	0.9883	0.9883	0.0006
22	Cibatu	0.9707	0.9706	0.0005
23	Cawang	0.9613	0.9613	0.0005
24	Kembangan	0.9497	0.9497	0.0000
25	Cilegon	0.9750	0.9750	0.0004
26	Bekasi	0.9644	0.9644	0.0006
27	Ngimbang	0.9993	0.9993	0.0003
28	Adipala	1.0392	1.0392	0.0005
29	Cilacap	1.0394	1.0394	0.0003
30	Kesugihan	1.0383	1.0383	0.0009
31	Sukatani	0.9732	0.9732	0.0004
32	Banten	0.9724	0.9724	0.0005
33	Muara Karang	0.9471	0.9471	0.0007
34	Lengkong	0.9582	0.9582	0.0000
35	Delta Mas	0.9732	0.9732	0.0006
36	Tambun	0.9634	0.9634	0.0007
37	Cikalong	0.9858	0.9858	0.0005
38	Bangil	0.9873	0.9873	0.0012
39	Tandes	0.9905	0.9905	0.0002
40	Duri Kosambi	0.9485	0.9485	0.0003
41	Batang	1.0302	1.0302	0.0012

Tabel 4.2 Rugi daya aktif saluran transmisi dan transformer pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018

No. Saluran	Saluran/Transformer	Rugi Daya Aktif (MW)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
1	LINE 01-04	4.664	4.659	0.103
2	LINE 02-35	0.600	0.599	0.195
3	LINE 03-02	0.059	0.059	0.053
4	LINE 03-17	0.245	0.246	0.154
5	LINE 05-06	0.009	0.009	0.817
6	LINE 06-14	3.923	3.925	0.047
7	LINE 06-25	0.485	0.480	0.920
8	LINE 07-23	1.145	1.145	0.006
9	LINE 07-31	0.033	0.033	0.252
10	LINE 08-11	1.907	1.908	0.033
11	LINE 08-19	3.703	3.705	0.052
12	LINE 10-38	4.542	4.555	0.284
13	LINE 11-10	4.501	4.498	0.075
14	LINE 11-30	0.359	0.359	0.000
15	LINE 13-37	2.243	2.242	0.026
16	LINE 14-24	2.537	2.538	0.057
17	LINE 14-34	1.266	1.271	0.338
18	LINE 15-13	1.604	1.602	0.138
19	LINE 15-24	0.845	0.847	0.214
20	LINE 16-03	1.793	1.793	0.006
21	LINE 16-07	0.562	0.563	0.105
22	LINE 16-13	0.498	0.498	0.004
23	LINE 17-20	5.116	5.115	0.007
24	LINE 17-21	0.017	0.017	0.106
25	LINE 17-37	0.002	0.002	0.179

Tabel 4.2 Rugi daya aktif saluran transmisi dan transformer pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 (lanjutan)

No. Saluran	Saluran/Transformer	Rugi Daya Aktif (MW)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
26	LINE 18-04	5.630	5.632	0.037
27	LINE 18-09	0.009	0.009	0.256
28	LINE 18-19	1.077	1.076	0.075
29	LINE 18-27	0.697	0.697	0.039
30	LINE 19-08	6.214	6.212	0.048
31	LINE 19-11	0.201	0.201	0.002
32	LINE 19-27	0.475	0.474	0.102
33	LINE 20-41	8.026	8.026	0.002
34	LINE 21-20	5.029	5.028	0.007
35	LINE 25-16	0.602	0.602	0.061
36	LINE 26-07	2.371	2.366	0.198
37	LINE 26-23	0.144	0.144	0.021
38	LINE 28-29	0.320	0.324	1.042
39	LINE 28-30	1.833	1.839	0.363
40	LINE 30-12	25.955	25.945	0.039
41	LINE 31-22	0.442	0.443	0.209
42	LINE 32-05	0.950	0.951	0.048
43	LINE 32-14	3.220	3.224	0.121
44	LINE 33-40	0.075	0.075	0.503
45	LINE 34-15	0.439	0.441	0.371
46	LINE 35-22	0.084	0.084	0.255
47	LINE 36-16	0.040	0.040	0.030
48	LINE 36-26	0.382	0.382	0.083
49	LINE 37-12	5.632	5.629	0.056
50	LINE 38-01	6.975	6.995	0.283

Tabel 4.2 Rugi daya aktif saluran transmisi dan transformer pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 (lanjutan)

No. Saluran	Saluran/Transformer	Rugi Daya Aktif (MW)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
51	LINE 39-09	0.259	0.260	0.397
52	LINE 40-24	0.216	0.216	0.001
53	LINE 41-19	12.882	12.882	0.002
54	TR-ADIPALA1	0.897	0.897	0.002
55	TR-BANTEN1	1.079	1.079	0.003
56	TR-CILACAP3	0.599	0.599	0.000
57	TR-CILACAP4	0.599	0.599	0.000
58	TR-CILACAP5	0.599	0.599	0.000
59	TR-CIRATA1	0.032	0.032	0.088
60	TR-CIRATA2	0.032	0.032	0.088
61	TR-CIRATA3	0.032	0.032	0.088
62	TR-CIRATA4	0.032	0.032	0.088
63	TR-CIRATA5	0.032	0.032	0.088
64	TR-CIRATA6	0.032	0.032	0.088
65	TR-CIRATA7	0.032	0.032	0.088
66	TR-CIRATA8	0.032	0.032	0.088
67	TR-CLMYA1	0.419	0.419	0.006
68	TR-CLMYA2	0.419	0.419	0.006
69	TR-GRATI1.0	0.042	0.042	0.002
70	TR-GRATI1.1	0.063	0.062	0.291
71	TR-GRATI1.2	0.063	0.062	0.291
72	TR-GRATI1.3	0.063	0.062	0.291
73	TR-GRATI2.0	0.042	0.042	0.002
74	TR-GRATI2.1	0.042	0.042	0.002
75	TR-GRESIK2.0	0.031	0.031	0.002

Tabel 4.2 Rugi daya aktif saluran transmisi dan transformer pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 (lanjutan)

No. Saluran	Saluran/Transformer	Rugi Daya Aktif (MW)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
76	TR-GRESIK2.1	0.047	0.047	0.279
77	TR-GRESIK2.2	0.047	0.047	0.279
78	TR-GRESIK2.3	0.047	0.047	0.279
79	TR-GRESIK3.0	0.031	0.031	0.002
80	TR-GRESIK3.3	0.047	0.047	0.279
81	TR-GRESIK4.1	0.031	0.031	0.002
82	TR-GRESIK4.2	0.031	0.031	0.002
83	TR-MTAWAR1.0	0.069	0.069	0.108
84	TR-MTAWAR1.1	0.101	0.101	0.066
85	TR-MTAWAR1.2	0.101	0.101	0.066
86	TR-MTAWAR1.3	0.101	0.101	0.066
87	TR-MTAWAR1.31	0.101	0.101	0.066
88	TR-MTAWAR2.1	0.101	0.101	0.066
89	TR-MTAWAR2.2	0.101	0.101	0.066
90	TR-MTAWAR3.1	0.138	0.138	0.047
91	TR-MTAWAR3.2	0.138	0.138	0.047
92	TR-MTAWAR3.3	0.138	0.138	0.047
93	TR-MTAWAR4.1	0.138	0.138	0.047
94	TR-MTAWAR4.2	0.138	0.138	0.047
95	TR-MTAWAR4.3	0.138	0.138	0.047
96	TR-MTAWAR5.0	0.069	0.069	0.108
97	TR-MTAWAR6.1	0.069	0.069	0.108
98	TR-MTAWAR6.2	0.069	0.069	0.108
99	TR-NEW SLAYA	1.018	1.018	0.001
100	TR-PAITON1	0.090	0.090	0.104

Tabel 4.2 Rugi daya aktif saluran transmisi dan transformer pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 (lanjutan)

No. Saluran	Saluran/Transformer	Rugi Daya Aktif (MW)		
		MATLAB	ETAP	Error (%)
101	TR-PAITON2	0.090	0.090	0.104
102	TR-PAITON3	0.497	0.497	0.075
103	TR-PAITON5	0.550	0.550	0.095
104	TR-PAITON6	0.550	0.550	0.095
105	TR-PAITON7	0.550	0.550	0.095
106	TR-PAITON8	0.550	0.550	0.095
107	TR-PAITON9	0.550	0.550	0.095
108	TR-SAGULING1	0.057	0.057	0.099
109	TR-SAGULING2	0.057	0.057	0.099
110	TR-SAGULING3	0.057	0.057	0.099
111	TR-SAGULING4	0.057	0.057	0.099
112	TR-SLAYA1	0.178	0.177	0.083
113	TR-SLAYA2	0.505	0.504	0.091
114	TR-SLAYA3	0.505	0.504	0.091
115	TR-SLAYA4	0.505	0.504	0.091
116	TR-SLAYA5	0.352	0.352	0.025
117	TR-SLAYA6	0.352	0.352	0.025
118	TR-SLAYA7	0.352	0.352	0.025
119	TR-TJATI1	0.496	0.493	0.596
120	TR-TJATI2	0.496	0.493	0.596
121	TR-TJATI3	0.496	0.493	0.596
122	TR-TJATI4	0.496	0.493	0.596
TOTAL		149.441	149.453	0.008

Tabel 4.1 menunjukkan tegangan tiap bus pada sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa bus

dengan tegangan yang diluar batasan ($0.95 \leq V \leq 1.05$) yaitu Kembangan (bus 24), Muara Karang (bus 33), dan Duri Kosambi (bus 40) dengan nilai tegangan masing-masing 0.9497 pu, 0.9471 pu, dan 0.9485 pu. Sedangkan dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa total rugi daya aktif sistem adalah 149.441 MW.

Dari tabel 4.1 dan 4.2 juga menunjukkan persentase *error* hasil simulasi MATLAB terhadap hasil simulasi ETAP. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa persentase *error* pada hasil simulasi menggunakan MATLAB jika dibandingkan dengan hasil simulasi ETAP adalah sekitar 1%.

Tabel 4.3 Arus masing-masing saluran pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018

No	Bus From	Bus To	I _{rating} (A)	I _{line} (A)
1	PAITON	GRATI	4800	1202.9
2	CIRATA	DELTA MAS	3960	751.2
3	SAGULING	CIRATA	3960	204.5
4	SAGULING	BANDUNG SELATAN	4800	445.3
5	NEW SURLAYA	SURLAYA	2400	277.5
6	SURLAYA	BALARAJA	3960	1158.4
7	SURLAYA	CILEGON	4800	992.4
8	MUARA TAWAR	CAWANG	1980	557
9	MUARA TAWAR	SUKATANI	3960	203.3
10	TANJUNG JATI	PEDAN	3240	391.5
11	TANJUNG JATI	UNGARAN	3240	684.1
12	KEDIRI	BANGIL	4800	1661.6
13	PEDAN	KEDIRI	4800	828.5
14	PEDAN	KESUGIHAN	4800	490.7
15	DEPOK	CIKALONG	4800	736.8
16	BALARAJA	KEMBANGAN	6480	1001.1
17	BALARAJA	LENGKONG	3960	1106.8

Tabel 4.3 Arus masing-masing saluran pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 (lanjutan)

No	Bus From	Bus To	I_{rating} (A)	I_{line} (A)
18	GANDUL	DEPOK	3960	1318.7
19	GANDUL	KEMBANGAN	4800	851.8
20	CIBINONG	SAGULING	4800	797.3
21	CIBINONG	MUARA TAWAR	1980	271.7
22	CIBINONG	DEPOK	3960	895.3
23	BANDUNG SELATAN	MANDIRANCAN	2400	508.7
24	BANDUNG SELATAN	UJUNG BERUNG	1980	93.2
25	BANDUNG SELATAN	CIKALONG	4800	103.6
26	KRIAN	GRATI	4800	1360
27	KRIAN	GRESIK	3960	95.2
28	KRIAN	UNGARAN	1980	348.7
29	KRIAN	NGIMBANG	1980	419.1
30	UNGARAN	TANJUNG JATI	4800	678.4
31	UNGARAN	PEDAN	1980	135.7
32	UNGARAN	NGIMBANG	1980	71
33	MANDIRANCAN	BATANG	3960	1253.3
34	UJUNG BERUNG	MANDIRANCAN	2400	503.2
35	CILEGON	CIBINONG	2400	240.4
36	BEKASI	MUARA TAWAR	1980	1498.8
37	BEKASI	CAWANG	1980	307.1
38	ADIPALA	CILACAP	6480	1498.7
39	ADIPALA	KESUGIHAN	6480	2107.8
40	KESUGIHAN	TASIK	4800	1486.6
41	SUKATANI	CIBATU	3960	640.7
42	BANTEN	NEW SURALAYA	3960	830.8

Tabel 4.3 Arus masing-masing saluran pada sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 (lanjutan)

No	Bus From	Bus To	I _{rating} (A)	I _{line} (A)
43	BANTEN	BALARAJA	3960	1500
44	MUARA KARANG	DURI KOSAMBI	6480	303.5
45	LENGKONG	GANDUL	3960	650
46	DELTA MAS	CIBATU	3960	268.6
47	TAMBUN	CIBNONG	3960	238.1
48	TAMBUN	BEKASI	3960	678.8
49	CIKALONG	TASIK	4800	1075.6
50	BANGIL	PAITON	4800	2066.9
51	TANDES	GRESIK	4800	597
52	DURI KOSAMBI	KEMBANGAN	6480	1098.9
53	BATANG	UNGARAN	3960	1588.4

Tabel 4.3 menunjukkan arus masing-masing saluran pada sistem kelistrikan Jawa Bali tahun 2018. Dari tabel tersebut diketahui bahwa tidak ada saluran yang mengalami *over load* karena rating arus penghantar lebih besar daripada arus yang mengalir pada saluran saat beban puncak.

4.4 Optimisasi Lokasi dan Kapasitas STATCOM Menggunakan GA

Simulasi optimisasi menggunakan GA pada sistem diperlukan untuk mendapatkan lokasi optimal pemasangan STATCOM. Besarnya nilai daya reaktif STATCOM juga ditentukan menggunakan GA untuk mendapatkan kondisi sistem yang lebih baik, dimana total rugi daya aktif paling kecil dan deviasi tegangan pada *load* bus berada pada standar $\pm 5\%$ V_{ref} . Optimisasi yang dilakukan untuk menentukan lokasi dan kapasitas dari STATCOM pada sistem mengikuti ketentuan pada sub bab 3.2.4.

Simulasi dilakukan dalam beberapa kali percobaan. Dari setiap percobaan akan dilihat hasil perbaikan dari kondisi awal sistem. Percobaan yang dilakukan sebanyak tiga kali, yaitu,

- Percobaan 1 : Pemasangan satu STATCOM
 Percobaan 2 : Pemasangan dua STATCOM
 Percobaan 3 : Pemasangan tiga STATCOM

Percobaan dilakukan hanya sampai pemasangan tiga STATCOM karena untuk jumlah pemasangan empat dan seterusnya tidak terlalu berpengaruh jika dibandingkan dengan pemasangan tiga STATCOM. Dan dari hasil percobaan 3, tegangan tiap bus pada sistem sudah memenuhi standar.

4.4.1 Percobaan 1

Pada percobaan 1 dilakukan simulasi untuk pemasangan satu STATCOM agar total rugi daya dapat berkurang dan tegangan tiap bus berada pada batasan yang ditentukan. Lokasi dan daya reaktif dari STATCOM ditentukan menggunakan GA untuk mendapatkan hasil paling optimal. Dari hasil simulasi, didapatkan lokasi STATCOM pada bus 40 dengan daya reaktif 299.89 MVAR. Berikut ini hasil simulasi setelah pemasangan satu STATCOM.

Tabel 4.4 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan satu STATCOM

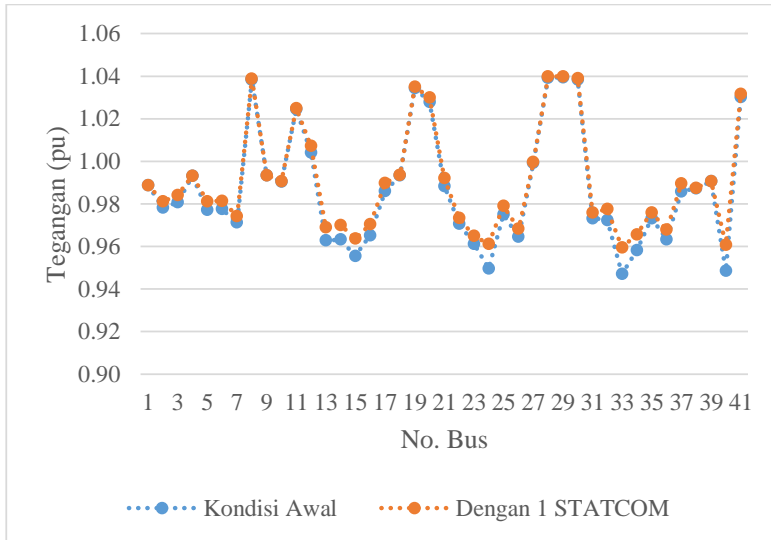
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
1	Paiton	0.9888	0.9888	0.0000
2	Cirata	0.9811	0.9811	0.0014
3	Saguling	0.9841	0.9841	0.0019
4	Grati	0.9932	0.9932	0.0007
5	New Suralaya	0.9812	0.9812	0.0007
6	Suralaya	0.9814	0.9814	0.0007
7	Muara Tawar	0.9742	0.9742	0.0013
8	Tanjung Jati	1.0388	1.0387	0.0023
9	Gresik	0.9935	0.9935	0.0006
10	Kediri	0.9907	0.9907	0.0022
11	Pedan	1.0249	1.0249	0.0019
12	Tasik	1.0072	1.0071	0.0014

Tabel 4.4 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan satu STATCOM (lanjutan)

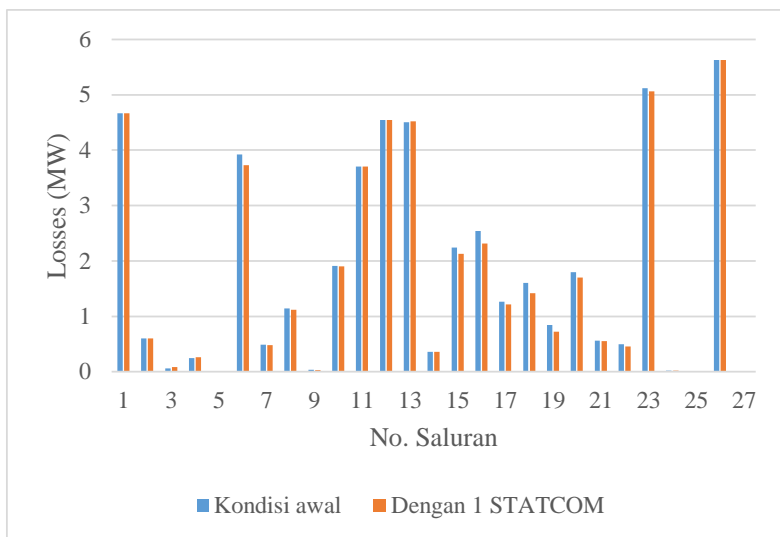
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
13	Depok	0.9690	0.9690	0.0025
14	Balaraja	0.9701	0.9701	0.0020
15	Gandul	0.9636	0.9636	0.0023
16	Cibinong	0.9704	0.9703	0.0020
17	Bandung Selatan	0.9898	0.9898	0.0015
18	Krian	0.9935	0.9935	0.0004
19	Ungaran	1.0351	1.0351	0.0017
20	Mandirancan	1.0299	1.0299	0.0017
21	Ujung Berung	0.9920	0.9920	0.0015
22	Cibatu	0.9734	0.9734	0.0013
23	Cawang	0.9649	0.9649	0.0016
24	Kembangan	0.9612	0.9611	0.0035
25	Cilegon	0.9790	0.9790	0.0008
26	Bekasi	0.9682	0.9682	0.0016
27	Ngimbang	0.9996	0.9996	0.0002
28	Adipala	1.0398	1.0398	0.0006
29	Cilacap	1.0399	1.0399	0.0004
30	Kesugihan	1.0389	1.0389	0.0011
31	Sukatani	0.9759	0.9759	0.0011
32	Banten	0.9775	0.9775	0.0010
33	Muara Karang	0.9595	0.9594	0.0041
34	Lengkong	0.9657	0.9657	0.0022
35	Delta Mas	0.9760	0.9760	0.0013
36	Tambun	0.9679	0.9679	0.0020
37	Cikalong	0.9897	0.9896	0.0015

Tabel 4.4 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan satu STATCOM (lanjutan)

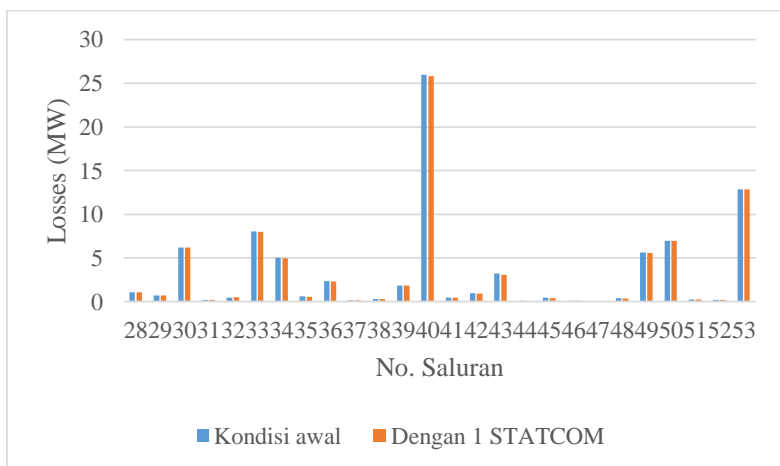
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
38	Bangil	0.9875	0.9875	0.0013
39	Tandes	0.9907	0.9907	0.0002
40	Duri Kosambi	0.9609	0.9608	0.0038
41	Batang	1.0316	1.0316	0.0016



Gambar 4.1 Grafik tegangan tiap bus saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM



Gambar 4.2 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 1-27)



Gambar 4.3 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 28-53)

Dari tabel 4.3 dan gambar 4.1 dapat diketahui bahwa setelah pemasangan STATCOM tegangan di beberapa bus mengalami perbaikan dan tegangan tiap bus berada pada batasan yang ditentukan ($0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$). Selain mengalami perbaikan tegangan, dari gambar 4.2 dan 4.3 dapat diketahui bahwa rugi daya aktif di beberapa saluran mengalami penurunan. Sehingga total rugi daya aktif berkurang dari 149.441 MW menjadi 147.541 MW.

4.4.2 Percobaan 2

Pada percobaan 2 dilakukan simulasi untuk pemasangan satu STATCOM agar total rugi daya dapat berkurang dan tegangan tiap bus berada pada batasan yang ditentukan. Lokasi dan daya reaktif dari STATCOM ditentukan menggunakan GA untuk mendapatkan hasil paling optimal. Dari hasil simulasi, didapatkan lokasi STATCOM pada bus 23 dan 40 dengan daya reaktif masing-masing 225.93 MVAR dan 299.78 MVAR. Berikut ini hasil simulasi setelah pemasangan dua STATCOM.

Tabel 4.5 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan dua STATCOM

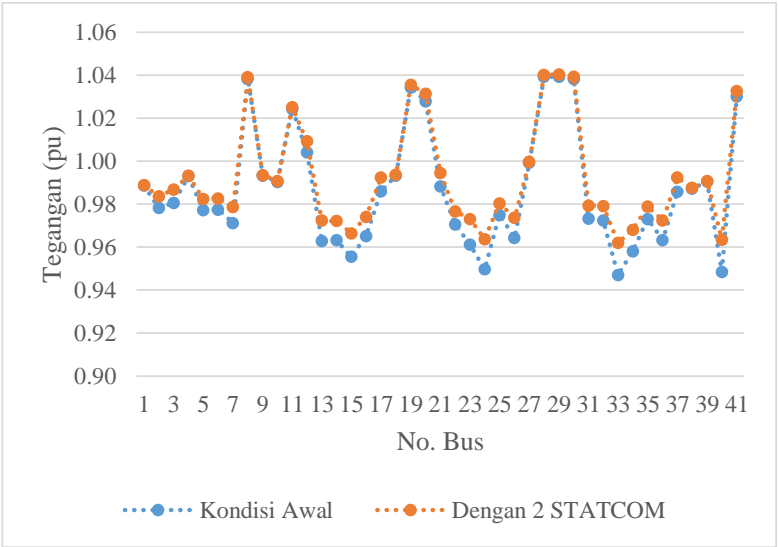
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
1	Paiton	0.9888	0.9888	0.0000
2	Cirata	0.9837	0.9837	0.0013
3	Saguling	0.9868	0.9868	0.0018
4	Grati	0.9933	0.9933	0.0007
5	New Suralaya	0.9825	0.9825	0.0006
6	Suralaya	0.9827	0.9827	0.0006
7	Muara Tawar	0.9786	0.9786	0.0012
8	Tanjung Jati	1.0390	1.0390	0.0023
9	Gresik	0.9936	0.9936	0.0006
10	Kediri	0.9909	0.9909	0.0022
11	Pedan	1.0252	1.0252	0.0019
12	Tasik	1.0093	1.0093	0.0014
13	Depok	0.9724	0.9724	0.0023

Tabel 4.5 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan dua STATCOM (lanjutan)

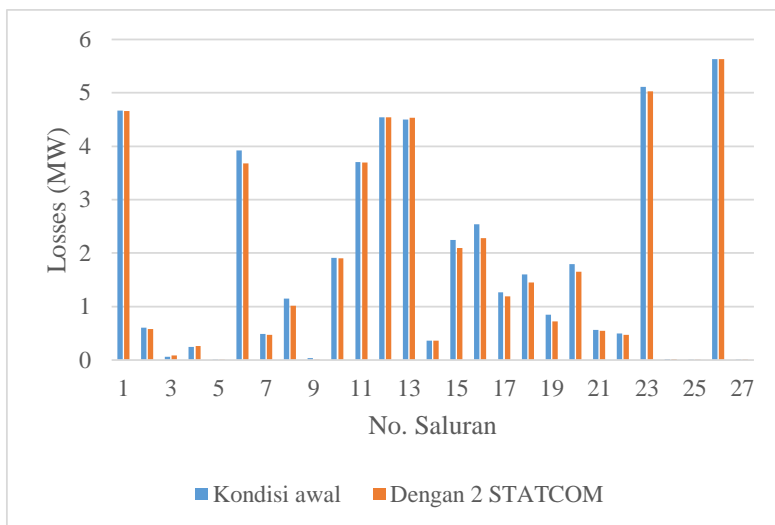
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
14	Balaraja	0.9722	0.9722	0.0017
15	Gandul	0.9665	0.9665	0.0020
16	Cibinong	0.9741	0.9741	0.0018
17	Bandung Selatan	0.9925	0.9925	0.0014
18	Krian	0.9936	0.9936	0.0004
19	Ungaran	1.0356	1.0356	0.0016
20	Mandirancan	1.0314	1.0313	0.0016
21	Ujung Berung	0.9946	0.9946	0.0014
22	Cibatu	0.9766	0.9766	0.0012
23	Cawang	0.9731	0.9731	0.0014
24	Kembangan	0.9638	0.9638	0.0030
25	Cilegon	0.9804	0.9804	0.0007
26	Bekasi	0.9736	0.9736	0.0015
27	Ngimbang	0.9998	0.9998	0.0003
28	Adipala	1.0402	1.0402	0.0006
29	Cilacap	1.0403	1.0403	0.0003
30	Kesugihan	1.0394	1.0394	0.0010
31	Sukatani	0.9794	0.9794	0.0010
32	Banten	0.9791	0.9791	0.0008
33	Muara Karang	0.9621	0.9621	0.0036
34	Lengkong	0.9682	0.9681	0.0019
35	Delta Mas	0.9789	0.9789	0.0012
36	Tambun	0.9725	0.9725	0.0018
37	Cikalong	0.9924	0.9924	0.0014
38	Bangil	0.9876	0.9876	0.0013

Tabel 4.5 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan dua STATCOM (lanjutan)

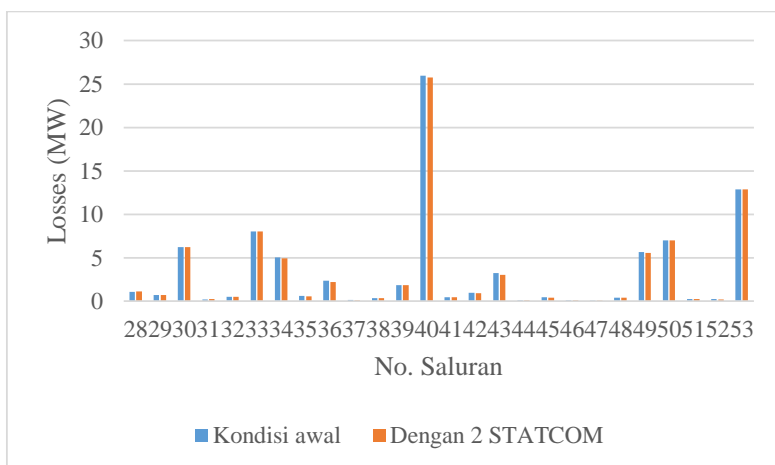
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
39	Tandes	0.9908	0.9908	0.0002
40	Duri Kosambi	0.9635	0.9635	0.0033
41	Batang	1.0326	1.0326	0.0016



Gambar 4.4 Grafik tegangan tiap bus saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM



Gambar 4.5 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 1-27)



Gambar 4.6 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 28-53)

Dari tabel 4.4 dan gambar 4.4 dapat diketahui bahwa setelah pemasangan STATCOM tegangan di beberapa bus mengalami perbaikan dan tegangan tiap bus berada pada batasan yang ditentukan ($0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$). Selain mengalami perbaikan tegangan, dari gambar 4.5 dan 4.6 dapat diketahui bahwa rugi daya aktif di beberapa saluran mengalami penurunan. Sehingga total rugi daya aktif berkurang dari 149.441 MW menjadi 146.680 MW.

4.4.3 Percobaan 3

Pada percobaan 3 dilakukan simulasi untuk pemasangan satu STATCOM agar total rugi daya dapat berkurang dan tegangan tiap bus berada pada batasan yang ditentukan. Lokasi dan daya reaktif dari STATCOM ditentukan menggunakan GA untuk mendapatkan hasil paling optimal. Dari hasil simulasi, didapatkan lokasi STATCOM pada bus 33, 23, dan 24 dengan daya reaktif masing-masing 281.89 MVAR, 296.98, dan 269.30 MVAR. Berikut ini hasil simulasi setelah pemasangan tiga STATCOM.

Tabel 4.6 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan tiga STATCOM

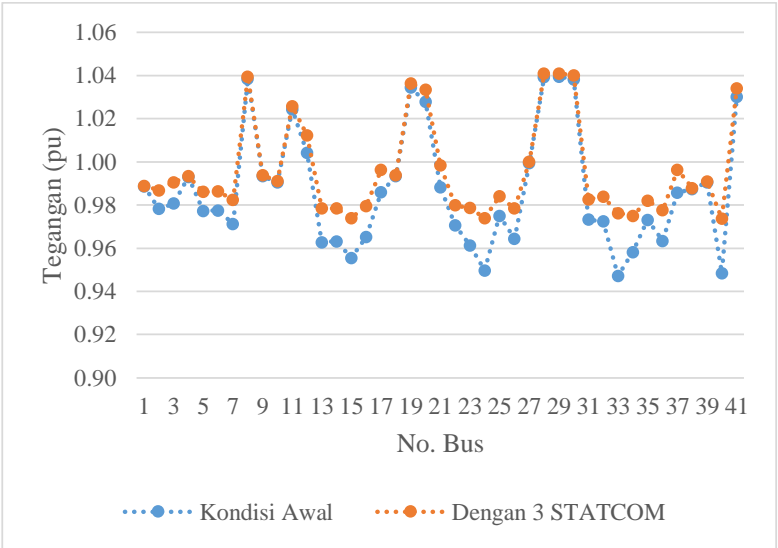
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
1	Paiton	0.9889	0.9889	0.0000
2	Cirata	0.9868	0.9868	0.0007
3	Saguling	0.9905	0.9905	0.0009
4	Grati	0.9934	0.9934	0.0008
5	New Suralaya	0.9861	0.9861	0.0003
6	Suralaya	0.9863	0.9863	0.0003
7	Muara Tawar	0.9824	0.9824	0.0006
8	Tanjung Jati	1.0394	1.0394	0.0022
9	Gresik	0.9937	0.9937	0.0006
10	Kediri	0.9911	0.9911	0.0022
11	Pedan	1.0258	1.0257	0.0017
12	Tasik	1.0124	1.0124	0.0007
13	Depok	0.9785	0.9785	0.0007

Tabel 4.6 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan tiga STATCOM (lanjutan)

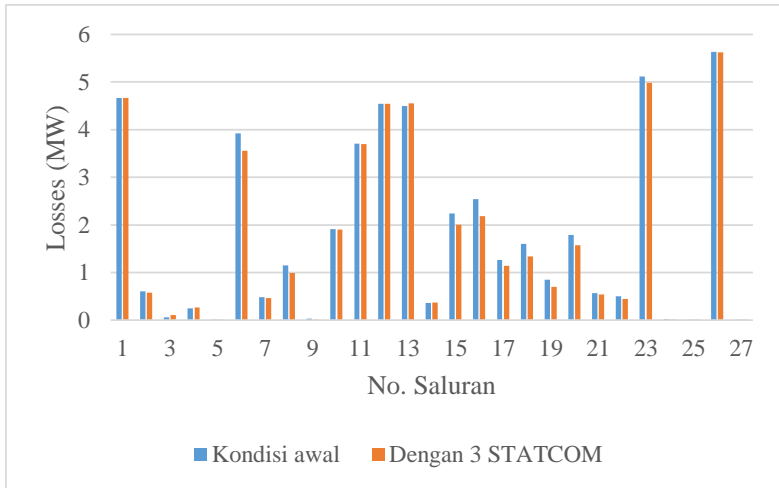
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
14	Balaraja	0.9784	0.9784	0.0000
15	Gandul	0.9740	0.9740	0.0001
16	Cibinong	0.9795	0.9795	0.0006
17	Bandung Selatan	0.9964	0.9964	0.0005
18	Krian	0.9938	0.9938	0.0005
19	Ungaran	1.0363	1.0363	0.0014
20	Mandirancan	1.0335	1.0335	0.0012
21	Ujung Berung	0.9984	0.9984	0.0005
22	Cibatu	0.9798	0.9798	0.0006
23	Cawang	0.9786	0.9786	0.0008
24	Kembangan	0.9740	0.9740	0.0003
25	Cilegon	0.9840	0.9840	0.0003
26	Bekasi	0.9784	0.9784	0.0006
27	Ngimbang	1.0000	1.0000	0.0004
28	Adipala	1.0408	1.0408	0.0004
29	Cilacap	1.0409	1.0409	0.0003
30	Kesugihan	1.0401	1.0401	0.0009
31	Sukatani	0.9826	0.9826	0.0005
32	Banten	0.9838	0.9838	0.0004
33	Muara Karang	0.9762	0.9762	0.0001
34	Lengkong	0.9750	0.9750	0.0001
35	Delta Mas	0.9821	0.9821	0.0006
36	Tambun	0.9775	0.9775	0.0008
37	Cikalong	0.9963	0.9963	0.0005
38	Bangil	0.9878	0.9878	0.0012

Tabel 4.6 Tegangan pada tiap bus sistem kelistrikan Jawa Bali 2018 setelah pemasangan tiga STATCOM (lanjutan)

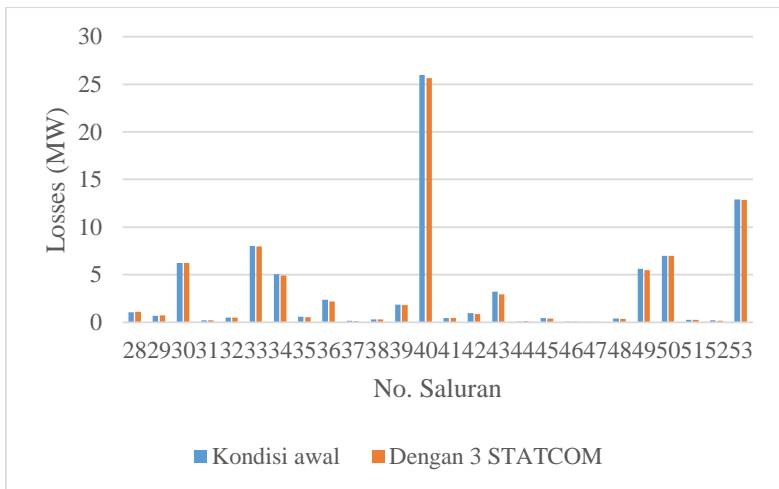
No. Bus	GITET	Tegangan (pu)		
		MATLAB	ETAP	Error(%)
39	Tandes	0.9909	0.9909	0.0002
40	Duri Kosambi	0.9736	0.9736	0.0004
41	Batang	1.0341	1.0341	0.0013



Gambar 4.7 Grafik tegangan tiap bus saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM



Gambar 4.8 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 1-27)



Gambar 4.9 Grafik rugi daya aktif saat kondisi awal dan setelah pemasangan STATCOM (pada no. saluran 28-53)

Dari tabel 4.5 dan gambar 4.7 dapat diketahui bahwa setelah pemasangan STATCOM tegangan di beberapa bus mengalami perbaikan dan tegangan tiap bus berada pada batasan yang ditentukan ($0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$). Selain mengalami perbaikan tegangan, dari gambar 4.8 dan 4.9 dapat diketahui bahwa rugi daya aktif di beberapa saluran mengalami penurunan. Sehingga total rugi daya aktif berkurang dari 149.441 MW menjadi 145.467 MW.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu sebagai berikut:

1. Saat kondisi beban puncak malam tahun 2018, total rugi daya aktif sistem kelistrikan Jawa Bali adalah 149.441 MW. Dengan pemasangan STATCOM maka rugi daya aktif pada sistem kelistrikan dapat berkurang menjadi 145.467 MW.
2. Selain mengurangi rugi daya aktif, pemasangan STATCOM pada sistem kelistrikan Jawa Bali dapat memperbaiki profil tegangan. Sehingga tegangan pada tiap bus berada pada batasan yang ditentukan ($0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$).
3. Dengan menggunakan metode *genetic algorithm* didapatkan lokasi optimal STATCOM yaitu di Gardu Induk 500 kV Cawang (bus 23), Kembangan (bus 24), dan Muara Karang (bus 33).

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan optimasi pemasangan beberapa tipe *FACTS Devices* dengan mempertimbangkan fungsi biaya (nilai ekonomis) dari peralatan tersebut.
2. Perlu dilakukan optimasi pemasangan STATCOM saat terjadi kontingensi pada sistem kelistrikan Jawa Bali.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.R. Phadke, Manoj Fozdar, K.R. Niazi, "A New Multi-objective Fuzzy-GA Formulation for Optimal Placement and Sizing of Shunt FACTS Controller," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 40, pp. 46-53, 2012.
- [2] B. Singh Rana, L. Srivastava, "Optimal Location and Sizing of STATCOM Using Fuzzy-PSO Approach," in *IEEE 6th International Conference on Power System (ICPS)*, 2016.
- [3] L. Dixit, L. Srivastava, G. Agnihotri, "Optimal Location and Sizing of STATCOM for Minimizing Power Loss and Improving Voltage Profile Using GA," *IJCSNT*, vol. 4, no. 01, 2014.
- [4] O. Penangsang, Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik, Surabaya: itspress, 2012.
- [5] H. Saadat, Power System Analysis, New York: McGraw-Hill, 1999.
- [6] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems, New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [7] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Ccesar Angeles-Camacho, FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, West Sussex: John Wiley & Sons, 2004.
- [8] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [9] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Canada: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [10] Suyanto, Algoritma Genetika dalam MATLAB, Yogyakarta: Penerbit ANDI, 2005.
- [11] PT PLN P2B Jawa Bali, Jakarta, 2017.
- [12] PT PLN, "RUPTL 2016-2025," Jakarta, 2016.
- [13] John J. Grainger, William D. Stevenson, Power System Analysis, Singapore: McGraw-Hill, 1994.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS

Penulis dengan nama lengkap Ristiardi Taharat PB dilahirkan di Ambeno pada tanggal 04 Agustus 1993 dan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menyelesaikan Pendidikan Dasar di SDN Lambang Sari 04 pada tahun 2005, menyelesaikan pendidikan menengah pertama di SMPN 26 Bekasi pada tahun 2008, menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Tambun Selatan pada tahun 2011, dan menyelesaikan pendidikan diploma III Teknik Elektro bidang studi Teknik Listrik di Politeknik Negeri Jakarta pada tahun 2014. Kemudian saat ini penulis menempuh program strata satu Teknik Elektro dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

Listing Program

```
%=====
=====
% Proses GA terdiri dari :
%
% 1. Satu populasi dengan UkPop kromosom
% 2. Binary encoding
% 3. Linear fitness rangking
% 4. Roulette wheel selection
% 5. Pindah silang satu titik potong
% 6. Probabilitas pindah silang dan probabilitas
mutasi bernilai tetap
% 7. Elitisme, satu atau dua copy dari individu
bernilai fitness tertinggi
% 8. Generation replacement : mengganti semua individu
dengan individu baru
%=====
=====

%clc;           % mererefresh command window
%clear;         % menghapus semua variabel yang
sedang aktif

Nvar = 3;       % Jumlah SSC
Nbit = 20;      % Jumlah bit yang mengkodekan satu
variabel
JumGen = Nbit*Nvar; % Jumlah gen dalam kromosom
Rb1 = 1;        % Batas bawah interval Lokasi
Ra1 = 41;       % Batas akhir interval Lokasi
Rb2 = -300;     % Batas bawah interval MVAR
Ra2 = 300;      % Batas atas interval MVAR

UkPop = 100;    % Jumlah kromosom dalam populasi
%UkPop2 = 20;
Psilang = 0.8;  % Probabilitas pindah silang
Pmutasi = 0.05; % Probabilitas mutasi
MaxG = 50;      % Jumlah generasi

BilKecil = 6.85; % Digunakan untuk menghindari
pembagian dengan nol
Fthreshold = BilKecil; % Fitness terbaik jika
fungsi memiliki nilai 0
Bgraf = Fthreshold; % Untuk menangani tampilan
grafis
```

```

% Inisialisasi grafis 2D
hfig = figure;
hold on
title ('Optimasi STATCOM menggunakan GA')
set(hfig,'position',[50,50,600,400]);
set(hfig,'DoubleBuffer','on');
axis([1 MaxG 6.70 Bgraf]);
hbestplot = plot(1:MaxG,zeros(1,MaxG));
htext1 = text(0.5*MaxG,Bgraf-0.010,sprintf('Fitness
Terbaik : %7.4f', 0.0));
htext2 = text(0.5*MaxG,Bgraf-0.015,sprintf('Lokasi :
%5.0f', 0.0));
htext3 = text(0.5*MaxG,Bgraf-0.020,sprintf('Daya
Reaktif : %5.2f', 0.0));
%htext4 = text(0.5*MaxG,Bgraf-0.025,sprintf('Nilai
minimum : %5.4f', 0.0));
xlabel('Generasi');
ylabel('Fitness Terbaik');
hold off
drawnow;

% Inisialisasi populasi
Populasi1 = InisialisasiPopulasi(UkPop, JumGen);
Populasi2 = InisialisasiPopulasi(UkPop, JumGen);

% Loop evolusi
for generasi = 1:MaxG
    [x1,x2] =
    DekodekanKromosom(Populasi1(1,:), Populasi2(1,:), ...
        Nvar, Nbit, Ra1, Rb1, Ra2, Rb2);
    %x2 =
    DekodekanKromosom(Populasi(1,:), Nvar, Nbit, Ra2, Rb2);
    Fitness(1) =
    EvaluasiIndividu(busdata, linedata, x1, x2, Nvar);
    MaxF = Fitness(1);
    MinF = Fitness(1);
    IndeksIndividuTerbaik = 1;

    for ii = 2:UkPop
        Kromosom1 = Populasi1(ii,:);
        Kromosom2 = Populasi2(ii,:);

```



```

        [x1,x2] =
DekodekanKromosom(Kromosom1,Kromosom2,Nvar,Nbit,...
        Ra1,Rb1,Ra2,Rb2);
        Fitness(ii) =
EvaluasiIndividu(busdata,linedata,x1,x2,Nvar);
        if (Fitness(ii)>MaxF)
            MaxF = Fitness(ii);
            IndeksIndividuTerbaik = ii;
            BestX1 = x1;
            BestX2 = x2;
        end
        if (Fitness(ii)<MinF)
            MinF = Fitness(ii);
        end
    end
    % Penanganan grafis
    plotvector = get(hbestplot,'YData');
    plotvector(generasi) = MaxF;
    set(hbestplot,'YData',plotvector);
    set(htext1,'String',sprintf('Fitness terbaik :
%7.4f',MaxF));
    set(htext2,'String',sprintf('Lokasi : %5.0f %5.0f
%5.0f',BestX1(1),BestX1(2),BestX1(3)));
    set(htext3,'String',sprintf('Daya Reaktif : %5.2f
%5.2f %5.2f',BestX2(1),BestX2(2),BestX2(3)));
    %set(htext4,'String',sprintf('Nilai minimum :
%5.4f',(1/MaxF)));

    if MaxF>=Fthreshold
        break
    end

    TemPopulasi1 = Populasi1;
    TemPopulasi2 = Populasi2;

    %Elitisme
    % Buat satu copy kromosom terbaik jika ukuran
populasi ganjil
    % Buat dua copy kromosom terbaik jika ukuran
populasi genap
    if mod(UkPop,2) == 0
        IterasiMulai = 3;
        TemPopulasi1(1,:) =
Populasi1(IndeksIndividuTerbaik,:);

```

```

        TemPopulasi1(2,:) =
Populasi1(IndeksIndividuTerbaik,:);
        TemPopulasi2(1,:) =
Populasi2(IndeksIndividuTerbaik,:);
        TemPopulasi2(2,:) =
Populasi2(IndeksIndividuTerbaik,:);

    else
        IterasiMulai = 2;
        TemPopulasi1(1,:) =
Populasi1(IndeksIndividuTerbaik,:);
        TemPopulasi2(1,:) =
Populasi2(IndeksIndividuTerbaik,:);
    end

    LinearFitness =
LinearFitnessRangking(UkPop,Fitness,MaxF,MinF);

    % Roulette wheel dan pindah silang
    for jj = IterasiMulai:2:UkPop
        IP1 = Roulettewheel(UkPop,LinearFitness);
        IP2 = Roulettewheel(UkPop,LinearFitness);
        if (rand<Psilang)
            Anak1 =
PindahSilang(Populasi1(IP1,:),Populasi1(IP2,:),JumGen)
;
            Anak2 =
PindahSilang(Populasi2(IP1,:),Populasi2(IP2,:),JumGen)
;

            TemPopulasi1(jj,:) = Anak1(1,:);
            TemPopulasi1(jj+1,:) = Anak1(2,:);
            TemPopulasi2(jj,:) = Anak2(1,:);
            TemPopulasi2(jj+1,:) = Anak2(2,:);
        else
            TemPopulasi1(jj,:) = Populasi1(IP1,:);
            TemPopulasi1(jj+1,:) = Populasi1(IP2,:);
            TemPopulasi2(jj,:) = Populasi2(IP1,:);
            TemPopulasi2(jj+1,:) = Populasi2(IP2,:);
        end
    end

    end

    %Mutasi dilakukan pada semua kromosom
    for kk = IterasiMulai:UkPop

```

```

        TemPopulasi1(kk,:) =
Mutasi(TemPopulasi1(kk,:),JumGen,Pmutasi);
        TemPopulasi2(kk,:) =
Mutasi(TemPopulasi2(kk,:),JumGen,Pmutasi);
    end

    % Generation replacement
    Populasi1 = TemPopulasi1;
    Populasi2 = TemPopulasi2;
end

```

function

```

%=====
=====
% Membangkitkan sejumlah Ukpops kromosom, masing-masing
kromosom
% berisi bilangan biner (0 dan 1) sejumlah JumGen
%
% Masukan
% Ukpops : ukuran populasi atau jumlah kromosom dalam
populasi
% JumGen : jumlah gen dalam kromosom
%
% Keluaran
% Populasi : kumpulan kromosom, matriks berukuran
Ukpops x JumGen
%=====
=====

```

function Populasi = InisialisasiPopulasi(UkPop,JumGen)

```

Populasi = fix (2*rand(UkPop,JumGen));
%=====
=====
% Mengkondekan kromosom yang berisi bilangan biner
menjadi individu
% x yang bernilai real dalam interval yang telah
ditentukan [Ra,Rb]
%
% Masukan
% Kromosom : kromosom, matriks berukuran 1 x JumGen
% Nvar : jumlah variabel
% Nbit : jumlah bit yang mengkodekan satu variabel
% Ra : batas atas interval

```

```

% Rb : batas bawah interval
%
% Keluaran
% x1 x2 : individu hasil decode kromosom
%=====
=====

function [x1,x2] =
DekodekanKromosom(Kromosom1,Kromosom2,Nvar,Nbit,...
    Ra1,Rb1,Ra2,Rb2)
for ii = 1:Nvar
    %Dekodekan Lokasi
    x1(ii) = 0;
    for jj = 1:Nbit
        x1(ii) = x1(ii) + Kromosom1((ii-1)*Nbit +
jj)*2^(-jj);
    end
    x1(ii) = round(Rb1 + (Ra1-Rb1)*x1(ii));
    %Dekodekan MVAR
    x2(ii) = 0;
    for jj = 1:Nbit
        x2(ii) = x2(ii) + Kromosom2((ii-1)*Nbit +
jj)*2^(-jj);
    end
    x2(ii) = Rb2 + (Ra2-Rb2)*x2(ii);
end
%=====
=====
% Mengevaluasi individu sehingga didapatkan nilai
fitnessnya
%
% Masukan
% x : individu
% BilKecil : bilangan kecil digunakan unruk
menghindari pembagian
% dengan 0
%
% Keluaran
% fitness : nilai fitness
%=====
=====

function Fitness =
EvaluasiIndividu(busdata,linedata,x1,x2,Nvar)

```

```

basemva = 100; accuracy = 10^-8; accel = 1.8; maxiter
= 100;
%Input Lokasi dan MVAR SSC
for i=1:Nvar
    if busdata(x1(i),2)==0
        busdata(x1(i),11) = x2(i);
    end
end
Lfybus
Lfnewton
%Busout
Lineflow
TVD = 0;
for i=1:nbus
    VD(i) = abs(Vm(i)-1.00);
    TVD = TVD + VD(i);
end
Fitness = (1/(real(SLT)+TVD))*1000;

%Constraint : Q limit Generator
%for i=1:nbus
%    if busdata(i,2)==2
%        if Qg(i)<=0 | Qg(i)>= busdata(i,10)
%            Fitness = 0;
%        end
%    end
%end

%=====
% Menskalakan nilai fitness ke dalam ranking sehingga
diperoleh
% nilai-nilai fitness baru yang berada dalam
rentang[MaxF,MinF]
%
% Masukan
% Ukpopt : ukuran populasi atau jumlah kromosom dalam
populasi
% Fitness : nilai fitness matrix ukuran 1 x Ukpopt
% MaxF : nilai fitness maksimum
% MinF : nilai fitness minimum
%
% Keluaran
% LFR : Linear Fitness Ranking

```

```
%=====
=====
```

```
function LFR =  
LinearFitnessRangking(UkPop,Fitness,MaxF,MinF)  
[SF,IndF] = sort(Fitness);  
for rr = 1:UkPop  
    LFR(IndF(UkPop-rr+1)) = MaxF-(MaxF-MinF)*((rr-  
1)/(UkPop-1));  
end
```

```
%=====
=====
```

```
% Memilih orangtua menggunakan LinearFitness, yaitu  
nilai fitness hasil  
% penskalaan. Pemilihan dilakukan secara proporsional  
sesuai dengan nilai  
% fitnessnya  
%
```

```
% Masukan  
% Ukpop : ukuran populasi atau jumlah kromosom dalam  
populasi  
% LinearFitness : nilai fitness yang sudah diskalakan  
%  
% Keluaran  
% Pindex : indeks dari kromosom yang terpilih  
(bernilai 1 sampai Ukpops)  
%
```

```
%=====
=====
```

```
function Pindex = Roulettewheel(UkPop,LinearFitness)  
JumFitness = sum(LinearFitness);  
KumulatifFitness = 0;  
RN = rand;  
ii = 1;
```

```
while ii<=UkPop  
    KumulatifFitness = KumulatifFitness +  
    LinearFitness(ii);  
    if (KumulatifFitness/JumFitness) > RN  
        Pindex = ii;  
        break;  
    end  
    ii = ii +1;
```

```

end
%=====
% Memindahsilangkan bagian kromosom bapak dan ibu yang
dipotong
% secara random, sehingga dihasilkan dua buah kromosom
anak
%
% Masukan
% Bapak : kromosom, matriks berukuran 1 x JumGen
% Ibu : kromosom, matriks berukuran 1 x JumGen
%
% Keluaran
% Anak : kromosom hasil pindah silang, matriks
berukuran 1 x JumGen
%=====
=====

function Anak = PindahSilang(Bapak,Ibu,JumGen)
TP = 1 + fix(rand*(JumGen-1));
Anak(1,:) = [Bapak(1:TP) Ibu(TP+1:JumGen)];
Anak(2,:) = [Ibu(1:TP) Bapak(TP+1:JumGen)];

%=====
=====
% Mutasi gen dengan probabilitas sebesar Pmutasi
%
% Masukan
% Kromosom : kromosom, matriks berukuran 1 x JumGen
% JumGen : jumlah gen
% Pmutasi : Probabilitas mutasi

% Keluaran
% MutKrom : kromosom hasil mutasi, matriks berukuran 1
x JumGen
%=====
=====

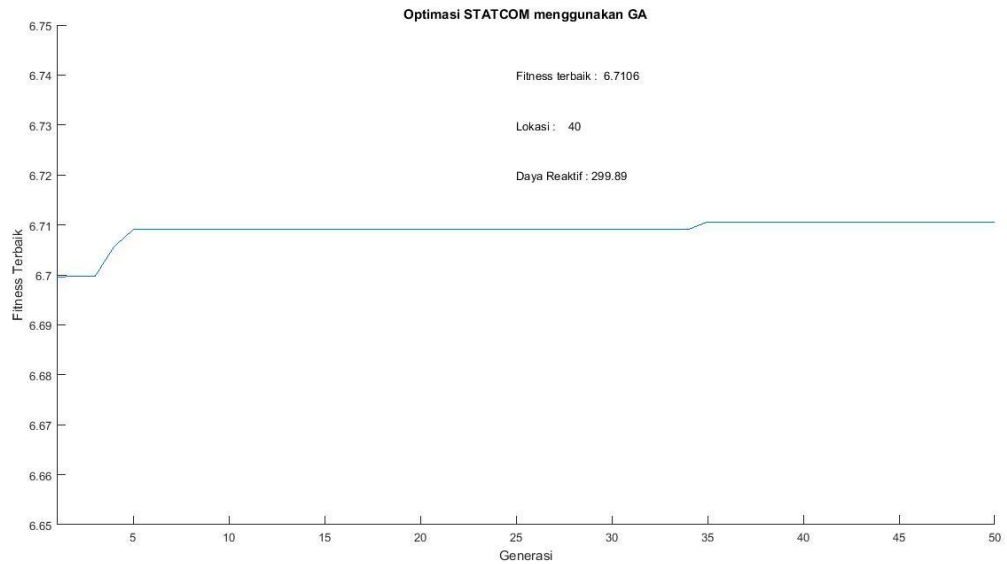
function MutKrom = Mutasi(Kromosom,JumGen,Pmutasi)
MutKrom = Kromosom;
for ii = 1:JumGen
    if (rand<Pmutasi)
        if Kromosom(ii) == 0
            MutKrom(ii) = 1;

```

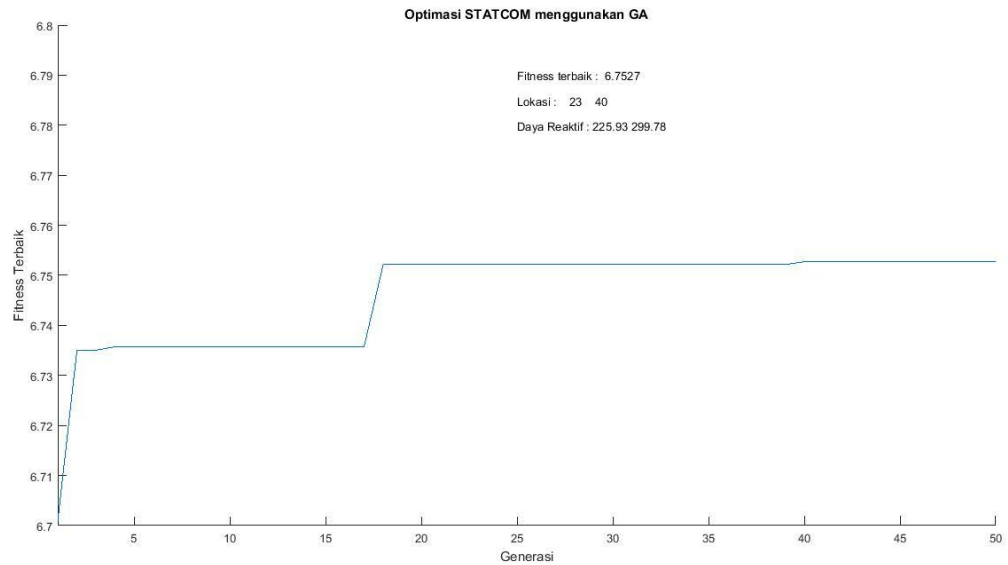
```
        else
            MutKrom(ii) = 0;
        end
    end
end
```


Grafik Konvergensi Optimasi Menggunakan GA

1. Percobaan 1



2. Percobaan 2



3. Percobaan 3

